



Hochschule Konstanz
Technik, Wirtschaft und Gestaltung

Fakultät Bauingenieurwesen
Fachbereich Konstruktiver Ingenieurbau

BIM im Membranbau

Konzipierung einer effizienten BIM-Kette für den Membranbau

Verfasser:	Anton Kanstantsinau
Matrikelnummer:	294544
Erstkorrektor:	Prof. Oliver Fritz
Zweitkorrektor:	Dr.-Ing. André Ihde
Arbeitsplatz:	IF-Ingenieure für Flächentragwerke GmbH
Abgabetermin:	31.07.2019

Konstanz, 31.07.2019

Der Vorsitzende des Prüfungsausschusses

Prof. Dr.-Ing. Sören Knoll

Abstract

The advancing digitalisation is currently one of the most important topics and at the same time one of the greatest challenges for the construction industry. Building Information Modeling (BIM) is becoming increasingly important.

It is certainly true that only a few projects in the construction industry currently meet the BIM requirements of the client. It is to be expected that in the coming years projects with tensile membrane structures will also have to meet more and more BIM requirements. For this reason, it is important that planning offices for lightweight structures are dealing with the subject of BIM.

The aim of this work is the elaboration of a concept for the efficient continuous implementation of the „Building Information Modeling“ working method for structural design in membrane structures.

Existing functionalities are investigated and alternative components for interoperability are developed. Based on the possible tool chains, different application methods are proposed. Subsequently, one of the possible methods will be implemented on a real structure. The results obtained will be subjected to a critical analysis. Final conclusions, evaluation of the applied planning methods and outlook summarize the discussed topic.

Methods used in the work include parametric design, manual modeling in two different software environments and textual programming with **C#** programming language.

The relevance of the investigated topic extends predominantly to practically active engineers from the areas of lightweight structures, unique structures, tensile membrane structures, but will also be of interest to scientific employees of research institutions, BIM specialists and product manufacturers.

Key words:

tensile membrane structure, lightweight structure, parametric design, visual programming, interoperability, BIM, IFC, RF-COM, Grasshopper3D, Rhinoceros, Revit, Allplan

Zusammenfassung

Die fortschreitende Digitalisierung wird zurzeit zu einem der wichtigsten Themen und zugleich zu einer der größten Herausforderungen für die Bauwirtschaft. Building Information Modeling (BIM) kommt eine immer größere Bedeutung zu.

Es ist sicherlich richtig, dass derzeit nur wenige Projekte im Bauwesen den geforderten BIM-Anforderungen der Bauherrschaft genügen. Es ist zu erwarten, dass in den kommenden Jahren auch an Membranbauprojekte immer mehr Anforderungen bezüglich BIM gestellt werden. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass sich Planungsbüros für leichte Flächentragwerke mit dem Thema BIM befassen.

Ziel dieser Arbeit ist die Ausarbeitung eines Konzepts für die effiziente durchgehende Umsetzung der „Building Information Modeling“-Arbeitsmethode bei der Tragwerksplanung im Membranbau.

Es werden vorhandene Funktionalitäten untersucht und alternative Interoperabilitätskomponenten entwickelt. Aufbauend auf den möglichen Werkzeugketten werden verschiedene Einsatzverfahren vorgeschlagen. Darauffolgend wird eines der möglichen Verfahren an einem realen Tragwerk implementiert. Die erhaltenen Ergebnisse werden einer kritischen Analyse unterzogen. Abschließende Rückschlüsse, Beurteilung der angewandten Planungsmethoden und Ausblick fassen das behandelte Thema zusammen.

Bei der Arbeit verwendete Methoden schließen den parametrischen Entwurf, manuelle Modellierung in zwei verschiedenen Softwareumgebungen und textliche Programmierung mit C#-Sprache ein.

Die Relevanz des untersuchten Themas erstreckt sich überwiegend auf praktisch tätige Ingenieure aus den Bereichen leichte Flächentragwerke, Sondertragwerke, Membranbau, wird aber auch für wissenschaftliche Mitarbeiter der Forschungsinstitutionen, BIM-Spezialisten und Produkthersteller von Interesse sein.

Schlagwörter:

Membranbau, Flächentragwerk, parametrischer Entwurf, visuelle Programmierung, Interoperabilität, BIM, IFC, RF-COM, Grasshopper3D, Rhinoceros, Revit, Allplan

Inhaltsübersicht und Aufbau

Die vorliegende Masterarbeit beschreibt und vergleicht die aktuellen strukturmechanischen Arbeitsabläufe für die Modellierung und Integration von leichten Flächentragwerken in verschiedene BIM-Umgebungen. Es wird mit einer Darstellung der aktuellen realen Planungssituation im Rahmen der Modellierung von Leichtbaustrukturen in BIM-Umgebungen begonnen.

Nach der Erörterung der für das allgemeine Verständnis der BIM-Arbeitsmethode notwendigen Grundlagen beginnt die softwareunabhängige Beschreibung der Herausforderungen der BIM-Darstellung/-Repräsentation von Leichtbaustrukturen. Im Anschluss daran werden die möglichen Lösungen entwickelt, vorgestellt und hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile bewertet.

Alle Verfahren werden am Beispiel eines realen, von den Beteiligten entwickelten Projekts vorgestellt. Die verwendete Beispielstruktur ist eine hybride Dachkonstruktion aus einem PTFE-Material, das von einer Stahlgitter-Schalenkonstruktion mit darunterliegender Glasfassade getragen wird.

Der Ausblick gibt Aufschluss über notwendige Anpassungen der Arbeitsmethoden, aber auch über weitere Anforderungen an die verwendeten Softwarepakete.

Überblick

„Building Information Modeling“ etabliert sich in der Baubranche und wird weltweit zu einer Pflicht für öffentliche Bauvorhaben. Membranstrukturen, ein Nischenmarkt des Bausektors, hinken dieser Entwicklung hinterher und sollten in diese Planungsmethode integriert werden. Die Komplexität dieser Aufgabe besteht in der Individualität jeglichen Entwurfs sowie in der Vielfalt von möglichen geometrischen Formen des Tragwerks.

Um den Umgang mit diesen Tragwerken zu erleichtern, müssen ausreichende alphanumerische Informationen zur Verfügung gestellt und mit den Strukturelementen verknüpft werden. Membranbaudetails sind derzeit kein Bestandteil von Standard-BIM-Lösungen. Sie sollten entwickelt und implementiert werden. Eines der vielversprechendsten Werkzeuge dafür ist der parametrische Ansatz von BIM, der umfangreiche Fähigkeiten für komplexe und unregelmäßige Formen aufweist.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den Konzepten der Integration von BIM-Softwarewerkzeugen zur Organisation des reibungslosen Datenaustauschs zwischen den Disziplinen für eine effiziente Abwicklung von Membranbauprojekten.

Zunächst wird Basisinformation zur Orientierung in BIM-bezogenen Planungsprozessen gegeben. Daraufgehend werden die allgemein verbreiteten Arbeitsmethoden mit zukünftigen BIM-Szenarien verglichen, sowie wesentliche Unterschiede zwischen den BIM-Projekten aus dem konventionellen Hochbau und Membranbau erörtert.

Als nächster Schritt werden die möglichen Lösungen skizziert und eine davon im Detail erarbeitet. Zur Kontrolle der Einsetzbarkeit des entwickelten Konzepts wird ein reales Tragwerk der ausführlichen Modellierung und Analyse unterzogen. Abgeleitete Ergebnisse werden kritisch überprüft und bewertet. Darüber hinaus werden weitere forschungsrelevante Themen aufgedeckt.

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, *Anton Kanstantsinau*, geboren am 08.03.1989 in Kischinew,

- (1) dass ich meine Masterarbeit mit dem Titel:

BIM im Membranbau

Konzipierung einer effizienten BIM-Kette für den Membranbau

bei „IF-Ingenieure für Flächentragwerke GmbH“ unter Anleitung von Prof. Oliver Fritz und Dr.-Ing. André Ihde selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe und keine anderen als die angeführten Hilfen benutzt habe;

- (2) dass ich die Übernahme wörtlicher Zitate, von Tabellen, Zeichnungen, Bildern und Programmen aus der Literatur oder anderen Quellen (Internet) sowie die Verwendung der Gedanken anderer Autoren an den entsprechenden Stellen innerhalb der Arbeit gekennzeichnet habe.
- (3) dass die eingereichten Abgabe-Exemplare in Papierform und im PDF-Format vollständig übereinstimmen.

Ich bin mir bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche Folgen haben wird.

Konstanz, 31.07.2019

(Unterschrift)

Danksagung

Während des Verfassens dieser Masterarbeit habe ich von verschiedenen Seiten Unterstützung in jeglicher Form erfahren, für die ich mich an dieser Stelle bedanke.

Vorrangig möchte ich mich beim Geschäftsleiter des Ingenieurbüros „IF-Ingenieure für Flächentragwerke GmbH“, Herrn Ralf Dinort, dafür bedanken, dass er bei der Wahl meines Themas aktiv mitgewirkt hat und mir die Möglichkeit gegeben hat, an einem der komplexesten Projekte aus der Ingenieurpraxis das in dieser Masterarbeit zusammengestellte Konzept auszuprobieren. Dafür vielen Dank.

Sehr dankbar bin ich Herrn Dr.-Ing. André Ihde für die Betreuung, Zweitkorrektur und Begleitung während der gesamten Ausarbeitungszeit meiner Masterarbeit. Die Weitergabe seiner Erfahrungen und seine vielfältigen Hinweise auf die inhaltliche Themengestaltung haben mich sehr unterstützt.

Vielen Dank auch an Herrn Prof. Oliver Fritz für die ideenreiche Unterstützung und Motivation. Seine Anregungen haben mich bei der Ausarbeitung meiner Masterarbeit inspiriert.

Mein besonderer Dank gilt auch den Mitarbeitern von „IF-Ingenieure für Flächentragwerke GmbH“ Frau Cornelia Kutt für die sprachlichen Korrekturen und Herrn Michael Hug für die freundliche Unterstützung und Hilfe bei allen Fragestellungen.

Für die Unterstützung in technischen sowie programmierungsbezogenen Fragestellungen bin ich Marcis Luksevics, Jon Mirtschin, Dimitrij Minich und Josef Leibinger sehr dankbar.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
1.1 Allgemeine Aktualität der Thematik BIM	1
1.1.1 Aktualität auf der Staatsebene	4
1.1.2 Literaturrecherche	5
1.1.3 Normung	7
1.2 Aktualität bezogen auf Sondertragwerke	9
1.3 Forschungsfragen	14
1.4 Ziele der Arbeit	15
2 Grundlagen	16
2.1 Grundlegende Definitionen	16
2.1.1 Semibegriff BIM	17
2.1.2 BIM-Reifegrad	18
2.1.3 LoX	19
2.2 Interne Rahmenbedingungen (BIM-Niveau auf Unternehmensebene) . . .	23
2.2.1 Von Closed-little-BIM zu Open-BIG-BIM	24
2.3 Chancen und Risiken	28
3 BIM im Membranbau	37
3.1 Vergleich zwischen Membranbau und anderen Baubereichen	38
3.1.1 Forschungsstand	42
3.1.2 Anpassung klassischer Projektorganisation an BIM-Arbeitsmethode	44
3.2 Detaillierte Behandlung einzelner Problemstellungen	46
3.2.1 Technische Problemstellungen	47
3.2.2 Herausforderungen beim Übergang zum neuen Konzept	52
3.2.3 Weitere Implementierungsschritte	53
3.3 Workflow-Konzipierung	54
3.3.1 Varianten der Zusammenarbeit im Membranbauprojekt	58
3.3.2 Anbindung an die Berechnung	59
3.3.3 Werkstattplanung	69
3.3.4 Vergleich BIM-Softwarepakete	71
3.3.5 Zusammenstellung eines endgültig formulierten Konzepts für BIM im Membranbau	76
3.3.6 Ausblick in die Zukunft	77

4	Beschreibung des praktischen Teils	80
4.1	Allgemeine Beschreibung des Tragwerks	80
4.2	Methoden und Werkzeuge	83
4.3	Abgrenzung des Untersuchungsraums	84
5	Modellierung und Anbindung FEM/BIM	86
5.1	Allgemeiner Überblick	86
5.2	Visuelle Programmierung	88
5.2.1	Detaillierter Workflow von einer Form bis zur Übergabe an das Berechnungsprogramm (Finite Elemente-Analyse)	89
5.3	Anbindung an FE-Analysis-Software Dlubal RFEM5 durch RF-COM Schnitt- stelle	106
5.4	Anbindung an BIM-Programm	110
5.4.1	Detaillierter Workflow vom Berechnungsergebnis bis zum BIM- Programm „Revit®“	110
5.4.2	Detaillierter Workflow vom Berechnungsergebnis bis zum BIM- Programm „Allpan®“	114
5.4.3	Enddetaillierung und Werkstattplanung	117
6	Anbindung an die Werkstattplanung und beispielhafte Planableitungen	118
7	Fazit	119
7.1	Überblick über den Aufbau der Arbeit	119
7.2	Zusammenfassung des Gesamtergebnisses	120
7.3	Interpretation der Ergebnisse (Ergebnisse der Einzelkapitel)	121
7.4	Rückschlüsse	122
7.5	Weiterer Forschungsbedarf	124
	Tabellenverzeichnis	127
	Abbildungsverzeichnis	128
	Literaturverzeichnis	132
	Anhang	136

Abkürzungsverzeichnis

API	Programmierschnittstelle (englisch: Application programming interface)
DIN	Deutsches Institut für Normung
CEN	Europäisches Komitee für Normung
COM	Schnittstelle zur Interprozesskommunikation (englisch: Component Object Model)
AIA	Auftraggeberinformationsanforderungen
BIM	(englisch: Building Information Modeling)
BAP	BIM-Abwicklungsplan, kurz BAP (englisch: BEP - BIM Execution Plan)
CAD	Rechnerunterstütztes Konstruieren (englisch: Computer-Aided Design)
CAM	Rechnerunterstützte Fertigung (englisch: Computer-aided manufacturing)
Addon	(Programm)Erweiterung (englisch: Additional Application)
ID	(Objekt-)Identifikator (englisch: identifier)
UI	User Interface
GUI	Grafische Benutzeroberfläche (englisch: Grafical User Interface)
CSV	.csv-Datenformat
B-Rep	Boundary Representation
3D	dreidimensionaler Entwurfsraum (X, Y und Z Richtung)
4D	BIM-Bauablaufplanung oder Bauablaufsimulation
5D	BIM-Planungsmethode mit automatischer Kostenermittlung
LoD	Fertigstellungsgrad oder Detaillierungsgrad (englisch: Level of Development or Level of Detailing)
LoG	Geometrischer Detaillierungsgrad (englisch: Level of Geometry)
LoI	Informationstiefe (englisch: Level of Information)

LoA	Genauigkeitsgrad (englisch: Level of Accuracy)
FE	Finite Elemente
FEM	Finite Elemente Methode
CPU	Zentralprozessor
StLB	Das Standardleistungsbuch für das Bauwesen
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
IFC	Industry Foundation Classes
IFD	International Framework Dictionary
IDM	Information Delivery Manual
ISO	International Organization for Standardization
BS	British Standard
EN	Europäische Norm
NBIMS	The National BIM Standard-United States [®]
SN	Schweizerische Norm
ÖN	Nationale Österreichische Norm (ÖNORM)
COBIM	Common BIM Requirements (Finnland)
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
SPEC	Spezifikation (Anforderungen an die Datenstruktur, Datengruppen und Schnittstellendefinitionen)
CNC	Rechnergestützte numerische Steuerung (englisch: computerized numerical control)

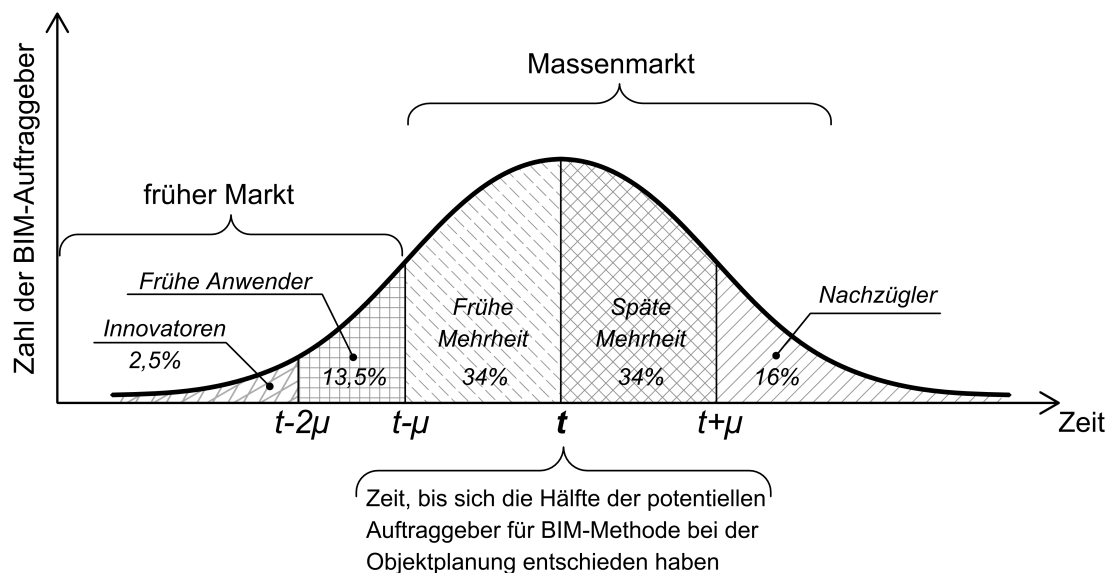
1 Einleitung

1.1 Allgemeine Aktualität der Thematik BIM

Dieser Abschnitt widmet sich der Frage, warum ist heute das Thema „Building Information Modeling“ (BIM) so aktuell. Die heute beobachteten Prozesse in Baubranche zeugen von einer großen Aufmerksamkeit aller Beteiligten zum Thema BIM. Aufgrund der großen Vielfalt der Interessen bei in Bauprojekten involvierten Teilnehmern wäre es an der Stelle hilfreich, einen systematischen Aufschluss über die von diesen gesetzten Prioritäten zu geben.

Die Suche nach einem Kompromiss zwischen Effizienz und dafür geleistetem Aufwand stehen immer im Mittelpunkt der Geschäftsprozesse. Bau- und Planungsprozesse sind keine Ausnahme davon.

Die Grafik des Verhaltens zwischen Zeit und Anzahl der modernisierten Unternehmen sollte zur Veranschaulichung dieser Hypothese dienen (Abbildung 1.1). Diese Grafik zeigt die Annahmquote eine Technologie bei den am Markt vorhandenen Firmen über die Zeit und macht deutlich zeitliche Abhängigkeit der Gewinne aus der Verwendung dieser Technologie vom Zeitperiode der Innovationsimplementierung.



wobei μ - Standardabweichung der angenommenen Normalverteilung ist.

Abbildung 1.1: Annahmquote der Innovationen

Quelle: in Anlehnung an (Behnke 2018, S.49)

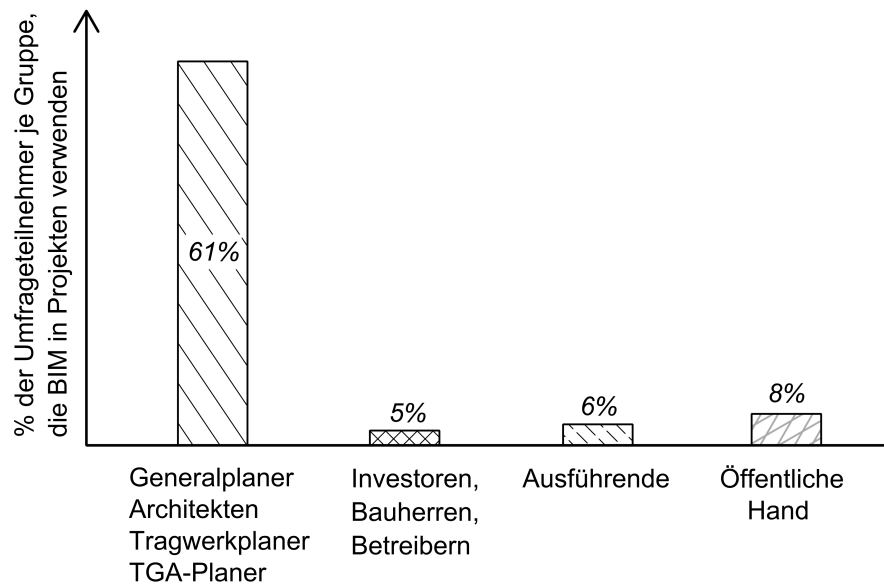
Am Beispiel BIM-Arbeitsmethode lässt sich diese Grafik folgendermaßen erklären. Die Nachfrage nach BIM-Projekten, vorerst angenommen mit komplett digitalem Modell mit fertigungs-, bau- und betriebsrelevanten Informationen (eine ausführliche Diskussion zur Begriffsdefinition BIM siehe Kapitel 2) wächst über die Zeit entsprechend gaußscher Normalverteilungskurve, bis sich diese Technologie voll etabliert und ein Muss-Standard wird. Dementsprechend steigen Erlöse aus der wachsenden Nachfrage nach BIM-Bauprojekten bis zu dem Zeitpunkt, an dem sich die Hälfte der potentiellen Bauherren für die BIM-Methode entschieden haben.

In Zusammenhang mit dieser Grafik werden Diskussionen über den aktuellen Standpunkt BIM-Technologie im Baubereich geführt (Behnke 2018, SS.47-54). Die Vorreiter der Technologie gehen davon aus, dass das Verwendungskonzept schon lange bei Planungsbüros im Einsatz ist. Der wesentliche Unterschied sei lediglich eine neue Begriffsdefinition BIM. Die Opponenten vertreten dagegen die Meinung, dass BIM ganz neu ist, nur von wenigen richtig verstanden wird und dessen echte Implementierung deswegen so oft ins Stocken kommt.

Die Frage rund um die BIM-Aktualität kann somit auf der wissenschaftlichen Basis mit der Grafik aus der Abbildung 1.1 auf der Seite 1 beantwortet werden. Dafür wird diese in die Fragestellung überführt, ob die Kurvenspitze bereits erreicht wurde oder noch nicht. Im Weiteren ist es wichtig, nach den Einsatzbereichen zu unterscheiden. Denn verschiedene Baubeteiligte stellen ganz spezifische Anforderungen an BIM und haben verschiedene Erwartungen und Vorstellungen davon. Diese Frage betrifft meine Arbeit nur sekundär, daher werde ich nicht auf die Interessen aller Beteiligten ausführlich eingehen, sondern gebe hier lediglich einen Überblick in Grafikform und setze meinen Fokus in weiteren Abschnitten auf die Tragwerksplanung.

Öffentlich zugängliche Quellen liefern unzureichende und widersprüchliche Daten. Es gibt zwar Marketinganalysen und Studien, die die Durchgängigkeit des BIM-Einsatzes je nach Anwendergruppen beschreiben, aber der Zugang auf diese Daten bleibt kommerziell eingeschränkt. Somit ist die Grafik „BIM-Nutzung nach Anwendergruppen“ als qualitative Annäherung an den real bestehenden Zustand anzusehen (Abbildung 1.2 auf der Seite 3). Die Daten wurden aus der Forschungsarbeit des Karlsruher Instituts für Technologie übernommen und entsprechen dem Jahr 2013. Als Basis für die zweite Grafik wurde die Studie des unabhängigen Beratungsunternehmens „Dr. Wieselhuber & Partner GmbH“ (W&P) genommen, diese stammt aus dem Jahr 2018 (Abbildung 1.3 auf der Seite 3).

Beide Grafiken zeigen Übereinstimmung was die Architekten und Fachplaner betrifft, aber auch Abweichungen bei anderen Gruppen. Diese Tatsache kann auf die unterschiedliche Teilnahmequote zurückgeführt werden.



* "Dabei ist allerdings das Verhältnis dieser Zielgruppen (und der hohe Anteil an teilnehmenden Planern) in der Gesamtheit der teilnehmenden Probanden zu berücksichtigen, so dass diese Aussagen nicht direkt generalisierbar sind." - S.69

Abbildung 1.2: BIM-Nutzung nach Anwendergruppen (Stand 2013)

Quelle: Nach Angaben aus (Both et al. 2013, SS.52-61)

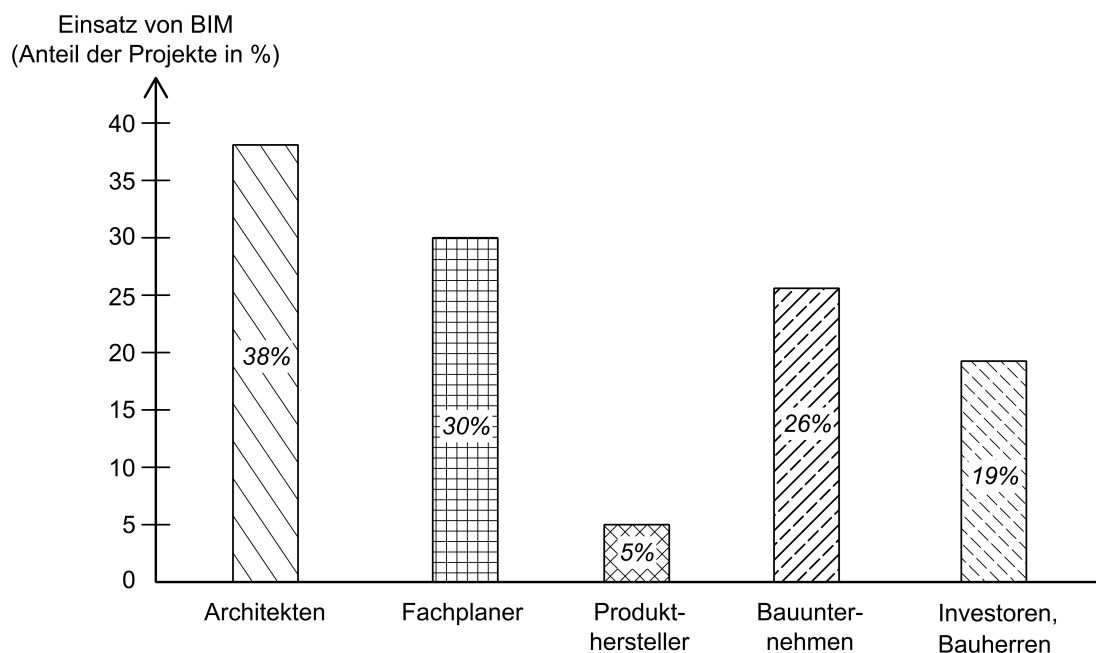


Abbildung 1.3: BIM-Nutzung nach Anwendergruppen (Stand 2018)

Quelle: In Anlehnung an die Abbildung 8 aus (Dr.Wieselhuber und Partner 2018, S.18)

Aus der Forschungsarbeit des Karlsruher Instituts für Technologie (Both et al. 2013, SS.52-61) wird ersichtlich, dass 59% der befragten Tragwerksplaner in ihren Projekten die BIM-Methode verwendet haben, was im Vergleich zu den Architekten eine größere

Quote bedeutete. Mit den zu Verfügung stehenden Daten kann man jedoch nicht wissenschaftlich beweisen, ob 2018 Tragwerksplanung im Vergleich zu anderen Bereichen besser abschneidet.

Als weitere Hilfsmittel zur Abschätzung der BIM Aktualität in der Baubranche können folgende explizite Aspekte miteinbezogen werden: Förderung des BIM-Einsatzes seitens der Politik, Präsenz und Zitierungsquote dieser Thematik in den Medien und Repräsentation in der Baunormung. Konferenzen und Seminare vermitteln uns nicht genug repräsentative Daten, da sie meistens von Softwarehäusern oder Vereinen organisiert und beeinflussbar sind. Man kann einen immer breiter werdenden Einsatz von BIM-Werkzeugen und Methoden an realen Projekten erkennen, indem man Projektberichte durcharbeitet. Da diese Berichte auch oft von BIM-Propagandisten kommen, kann es bei der Analyse ebenso zu Verfälschung der Objektivität führen.

Besondere Beachtung verdienen Forschungsvorhaben an den Instituten und Universitäten. Die meisten davon gehen in Richtung BIM am Bau und im Betrieb. Nur wenige davon sind unmittelbar mit tragwerksplanerischen Aspekten des BIM-Einsatzes verbunden (Eisfeld et al. 2012), (Harte, Stopp 2016). Im Ausland laufen einige ähnliche Forschungen, diese werden allerdings an dieser Stelle ausgelassen.

1.1.1 Aktualität auf der Staatsebene

In Zeiten immer weiter fortschreitender Globalisierung werden BIM-Fähigkeiten mittlerweile zu einer entscheidenden Eigenschaft im Konkurrenzkampf um Projekte im Ausland. Dabei möchten die Regierungen jedes Landes ihre eigene Interessen unterstützen und auf Dauer sichern. Heute wird bei öffentlichen Projekten häufig verbindlich die Verwendung der BIM-Methode gefordert. Dadurch erhöhen die Behörden das Niveau für den Zugang zu den internen Bauprojekten und treiben somit eigene Baufirmen zu einer intensiven Entwicklung und Modernisierung an. Zur Veranschaulichung der beschriebenen Prozesse sind in der folgenden Abbildung Länder dargestellt, in denen Regierungen und Ministerien diese Technologie als verbindlich vorgeschrieben haben, in Abhängigkeit von der Zeit der Einführung (Abbildung 1.4 auf der Seite 5).

Aus der vorgelegten Grafik wird es ersichtlich, dass die Relevanz der Thematik BIM von den führenden Ländern der Welt, auch Deutschland, erkannt wurde. Dadurch wird die Bauwirtschaft implizit auch in denen Ländern weltweit vorangetrieben, wo es bislang keine Normenentwicklung in Richtung verbindlicher BIM-Einführung gegeben hat. Daraus lässt sich schließen, dass die politischen Kräfte auf den Erfolg der Einführung mitwirken und zu dem wichtigen Indikator der BIM-Anerkennung in der ganzen Welt werden.

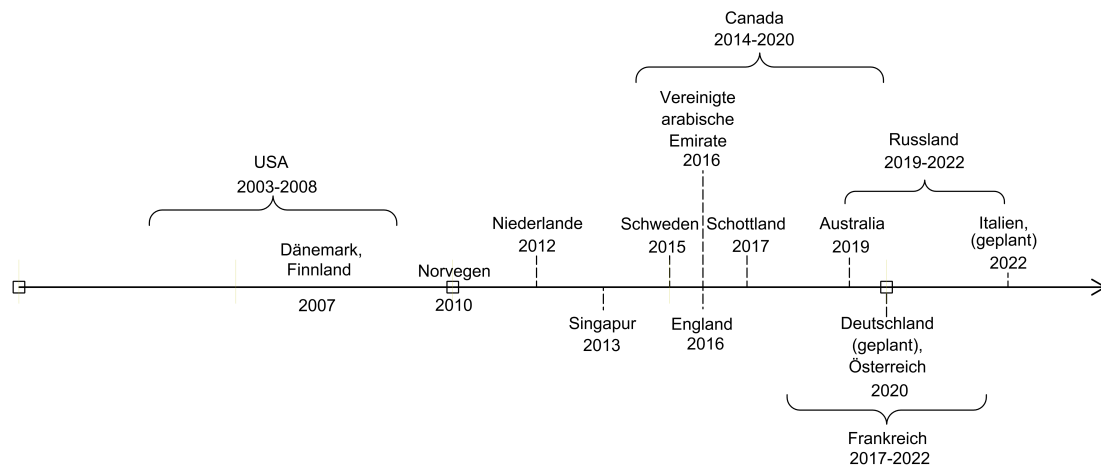


Abbildung 1.4: Verbindliche Einführung BIM-Projektausführung bei öffentlichen Projekten nach Ländern

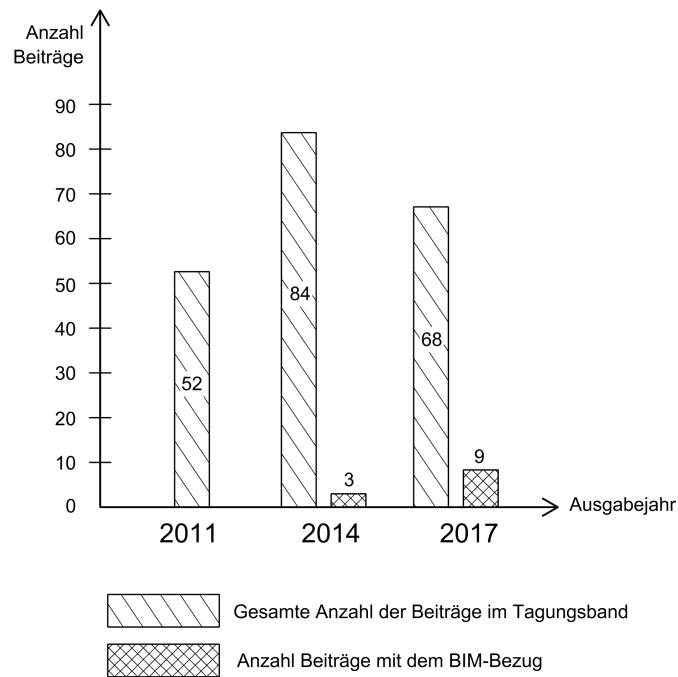
Quelle: Aus verschiedenen Quellen

1.1.2 Literaturrecherche

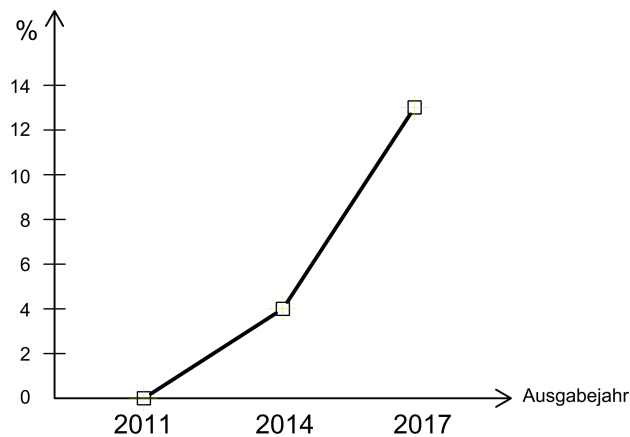
Ein weiteres Merkmal eines steigenden Interesses an BIM ist die Anzahl der Publikationen und Veröffentlichungen in den Medien. Die Auswahl an thematisch verbundenen Literaturquellen bereitet Schwierigkeiten für eine objektive Bewertung. Unterschiede zwischen einer unabhängigen und einer Marketingbeeinflussten Publikation sind gering und diese Tatsache bleibt meistens nicht explizit angegeben.

Deswegen möchte ich meine beispielhafte Recherche auf die fachspezifischen Sammelwerke begrenzen, die keinen expliziten Bezug zu BIM-Propagandisten haben. Angesichts der tragwerksplanungsbezogenen Thematik vorliegender Masterarbeit wurden als repräsentant und objektiv die Berichte der Fachtagung „Baustatik-Baupraxis“ eingeschätzt. Bei dem gleichnamigen Seminar, das alle 3 Jahre durchgeführt wird, werden Forschungsergebnisse und Projekte aus allen Bereichen des Bauwesens präsentiert.

Unter den 52 Vorträgen im Jahr 2011 gab es keine mit BIM zusammenhängenden (Beer 2011). 2014 findet man 3-4 Vorträge aus insgesamt 84, die einen impliziten Bezug zu dem Thema BIM hatten (Bletzinger 2014). 2017 stand der Begriff BIM in 9 aus 68 Vorträgen als Hauptthema oder in einer engen Verbindung mit dem Thema Berechnungen am Gesamtmodell (Meschke 2017). Ergebnisse sind in den Grafiken in der Abbildung 1.5 auf der Seite 6 zusammengestellt. Im Vergleich zu den anderen Fachgebieten sieht der prozentuale Anteil solcher Beiträge im letzten Tagungsband „Baustatik-Baupraxis“ (Meschke 2017) bescheiden aus. Es wurden bei der Konferenz „Advances in Informatics and Computing in Civil and Construction Engineering“, die im Oktober 2018 stattfand, aus insgesamt 108 Beiträgen 42 Beiträge den BIM-bezogenen Themen gewidmet (Mutis 2019), darunter stehen 10 Beiträge im engen Zusammenhang mit der Tragwerksplanung.



a) Anzahl der Beiträge im Tagungsband insgesamt und mit dem BIM-Bezug



b) Prozentualer Anteil der betreffenden BIM-Thematik Beiträge von der Gesamtanzahl

Abbildung 1.5: Anzahl von Beiträgen im Tagungsband „Baustatik-Baupraxis“, die inhaltlich BIM betreffen:

- a) Anzahl der Beiträge im Tagungsband insgesamt und mit dem BIM-Bezug
- b) Prozentualer Anteil der betreffenden BIM-Thematik Beiträge von der Gesamtanzahl

Auch Forum „Bauinformatik“ im September 2018 in Weimar zeigte eine hohe Anzahl an Themen, die BIM-Modellierung und Simulation betreffen. Statistisch gesehen kommt im entsprechenden Tagungsband das Thema BIM in 17 aus 49 Fachvorträgen vor (Steiner 2018).

1.1.3 Normung

Auch Normenentwicklung steht zum Zeitpunkt dieser Masterarbeit unter rasantem Wandel. Im Zusammenhang mit Normung lässt sich deutlich erkennen, dass das heutige BIM vielmehr an die konventionellen Baubereiche wie Hochbau oder Infrastruktur angepasst wird. Sondertragwerke, zu denen auch die in meiner Arbeit behandelten Membrantragwerke zählen, werden in der Normung und in der Literatur gar nicht oder sehr bescheiden dargestellt.

Normierung ist ein Bestandteil der staatlich geförderten Maßnahmen für die Beschleunigung des Übergangs zu BIM-konformer Planung, Bau und Nutzung, da die Ausarbeitung neuer Normen meistens von den staatlich finanzierten Institutionen geführt wird. Somit vermitteln vorhandene oder in Ausarbeitung stehende Normen die vom Staat gesetzten Randbedingungen und die Abweichungsmöglichkeiten bei ihrer Umsetzung. Die Normen deuten auf den Umfang der durchführbaren Änderungen hin, fassen alle heute zur Verfügung stehenden Werkzeuge und Methoden zusammen und schreiben eine einheitliche Vorgehensweise bei der Anwendung dieser Methoden vor.

Außerdem hilft eine Analyse der aktuell weltweit funktionierenden Normen und deren Vergleich zwischen den Ländern auch der Aufklärung der Aktualität der BIM-Thematik. Hier lassen sich aus dem Vergleich von international verabschiedeten oder zur Verabschiedung geplanten Normen einige Rückschlüsse ziehen (Tabelle 1.1).

Bezeichnung (Land)	Zeitpunkt des Ausarbeitungsbeginns	Zeitpunkt der Einführung
BS PAS-1192 (UK)	2006	2007
BS EN ISO 19650 (UK)	2018	2019-2020(geplant)
NBIMS-US (USA)	2007	2007 ¹
ISO 29481 (international)	2010	2016
SN EN ISO 29481 (CH)	2016	2017
SN EN ISO 12006 (CH)	2016	2017
VDI 2552 (DE)	2015	2017-2019(geplant)
ÖN 6241 (Österreich)	2014	2015-07-01

¹ wird ständig erweitert

Tabelle 1.1: Überblick über die international verabschiedeten (geplanten) BIM-Normen (Vollständige Bezeichnungen findet man im Anhang).

Auch weitere europäische Länder kümmern sich um die Normschaffung:

- Dänemark hat seinen Standard 2007 aus ISO übernommen.
- Norwegen hat einen „Statsbygg Building Information Modelling Manual“ (SBM) von der norwegischen öffentlichen Verwaltungsbehörde eingeführt. Das Dokument hat Verweise größtenteils auf ISO-Normen.
- Finnland - COBIM 2012 (Erstveröffentlichung 2007)
- In Schweden veröffentlicht das Swedish Standards Institute (SIS) seit 1991 eine Reihe von Leitfäden.
- 2011 wurde von der staatlichen Baubehörde der Niederlande (Reichsgebäudedienst - RGD) BIM Standard veröffentlicht.

Auf nationaler Ebene wird Normung stark von dem Verband der Deutschen Ingenieure begleitet. Aktuell arbeiten alle nationalen Normenausschüsse in engem Zusammenhang mit den internationalen Institutionen. Hierfür noch eine Liste der ausgegebenen nationalen Normen in Deutschland und ein grafischer Überblick über ihre Entwicklung über die Zeit und die aktuell funktionierenden Normen (Abbildung 1.6):

- Ri – EDV – AP - 2001 Richtlinie für das Aufstellen und Prüfen EDV-unterstützter Standsicherheitsnachweise¹
- VDI 2552 Richtlinien BIM²
- VDI 6201 Softwaregestützte Tragwerksberechnung (Reihe 2015-2017)²
- DIN SPEC 91350 - Verlinkter BIM-Datenaustausch von Bauwerksmodellen und Leistungsverzeichnissen (2016-11)
- DIN SPEC 91391-1 Gemeinsame Datenumgebungen (CDE) für BIM-Projekte (Common Data Environment) (2019-04)

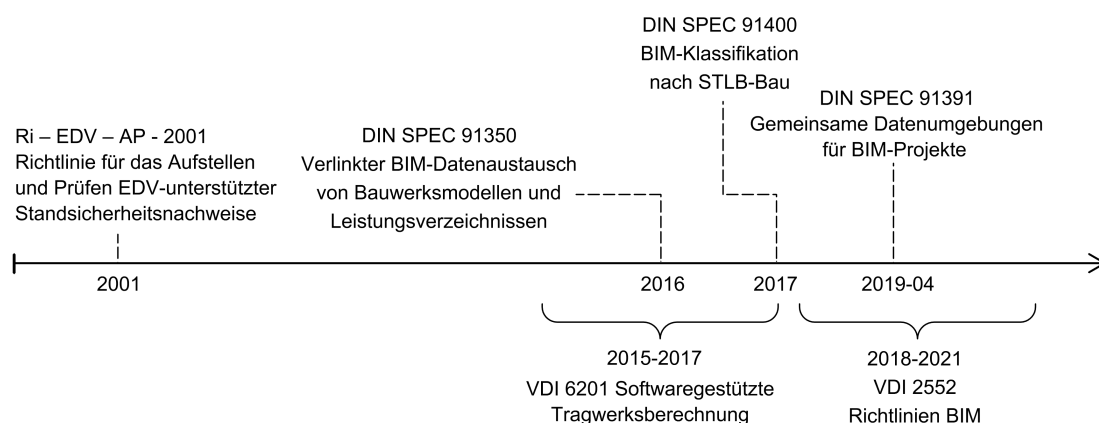


Abbildung 1.6: Überblick über die BIM-Normenentwicklung in Deutschland

¹<http://www.buev-ev.de/images/pdf-dokumente/edv-richtlinie.pdf>

²<https://www.vdi.de/richtlinien>

1.2 Aktualität bezogen auf Sondertragwerke

Der Membranbau kann als ein Teilbereich von Sondertragwerken angesehen werden. Im Unterschied zu den Problemen bei Sondertragwerken sind die Anforderungen im Membranbau spezifischer. Sie zeichnen sich durch die Abbildung verschiedener Zustände (der Montagezustand, Endzustand, eventuell weitere Zustände, wie es bei wandelbaren Membranüberdachungen der Fall ist) und durch die Zuschnittsermittlung und ggf.-repräsentation im 3D-Modell aus.

Da die Membranen meistens bei Sondertragwerken den Einsatz finden, kann der BIM-Reifegrad bei diesen zwei Tragwerksarten allgemein gesehen untersucht werden. Einerseits gehen die Softwareentwickler dem Wunsch der Anwender nicht besonders aktiv nach, da die Sondertragwerke inklusive Membranbauanteil eine viel kleinere Nische im Bauwesen darstellen. Sie sind für die Softwarehäuser wegen niedrigerer Nachfrage unattraktiv.

Andererseits werden immer mehr Versuche unternommen, die vorhandenen Funktionalitäten den Anforderungen bei Sondertragwerken anzupassen. Der Umfang solcher Maßnahmen bleibt jedoch oft der breiten Öffentlichkeit nicht bekannt, weil die Dokumentierung der erreichten Ergebnisse das unternehmensinterne Eigentum darstellt und als ein wichtiger Wettbewerbsfaktor angesehen wird.

Zu den ersten weniger erfolgreichen Ansätzen lassen sich kritische Publikationen finden, in denen die aufgetauchten Problemstellen bei der BIM-Verwendung eingehend beschrieben werden. So wird in diesem Zusammenhang im Weiteren auf den Bericht über die Planung des Olympiastadions in London eingegangen (Lin, Roithmayr 2015).

Durch den existierenden Bedarf an selbstständigen Erweiterungen, nichtstandardisierten Bauteilbibliotheken und hochkompetenten Fachkräften verlangsamt sich die BIM-Einführung im Membranbausektor. Fachkräfte müssen mit den Themen wie Erweiterungsentwicklung und Erstellung der Bauteilbibliotheken selbstständig umgehen können. Dadurch wird das Thema ihrer Weiterbildung sehr aktuell.

BIM wird außerdem in einen engen Bezug zum parametrischen Entwerfen gebracht. So spricht beispielsweise Steinegger von dem verstärkenden Effekt des parametrischen Entwurfs auf BIM-basiert geführte Projekte (Steinegger 2015, S.61).

Nach der Abbildung 1.7 auf der Seite 10 werden Ähnlichkeiten von BIM und parametrischem Entwurf ersichtlich. Der Aufwand verschiebt sich stark in frühere Entwurfsphasen bei den beiden Methoden (Kurven 4 und 5 auf der Abbildung 1.7). Somit kann BIM als eine logische Fortsetzung für die Verwendung des parametrischen Entwurfs in früheren Leistungsphasen betrachtet werden.

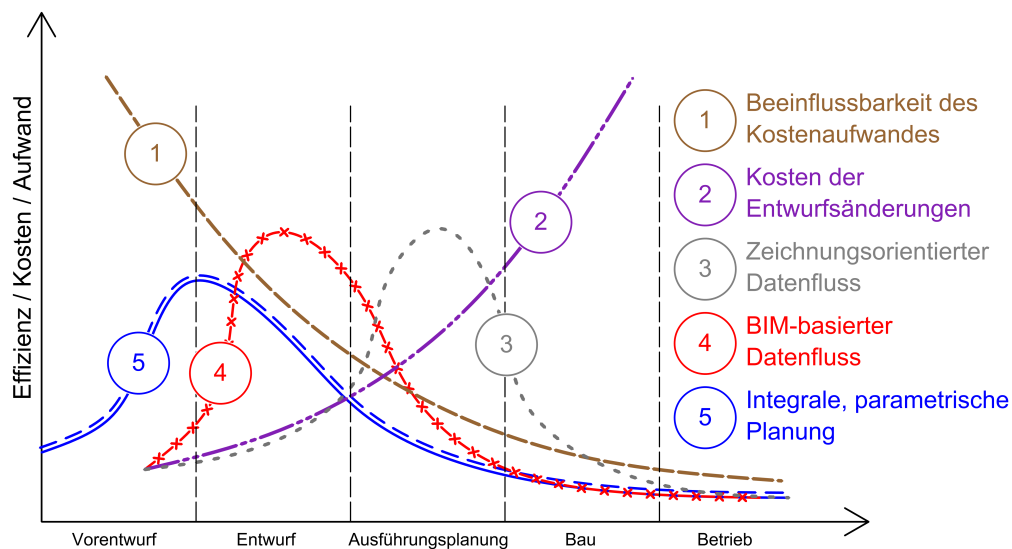


Abbildung 1.7: Einfluss von integraler parametrisch unterstützter Planung
 Quelle: In Deutsch übersetzt aus (Steinegger 2015, S.61) übernommen

Angesichts erkennbarer Ähnlichkeiten, was die Verschiebung des Aufwands nach vorne und die Sicherstellung einer verbesserten Entscheidungsgrundlage angeht, können bei ihrer gleichzeitigen Verwendung positive Auswirkungen erwartet werden. Anders ausgedrückt bedeutet es, dass die Zeitersparnis dank dem parametrischen Entwurf in späteren Phasen nicht verlorengehen muss, was durch den BIM-Ansatz ermöglicht wird.

Fraglich jedoch bleibt, ob diese Aufwandsverschiebung bei der HOAI korrekt berücksichtigt wird. Mögliche Anpassungen wegen der Vergabe der Ausführungsplanung an ein anderes Planungsteam müssen auch in Erwägung gezogen werden.

Die Verbreitung der komplexen Projekte mit freien Flächenformen steigt überall in der Welt. Hierfür verweise ich auf beispielhafte Projekte (Abbildung 1.8).



a) Der Amphitheater im Sarjadje-Park in Moskau



b) Baha'i Temple of South America, Santiago, Chile

Abbildung 1.8: Einsatzbeispiele des parametrischen Entwurfs

Unter den Fachleuten wird es als unvorstellbar erachtet, dass die Planung solcher Tragwerke ohne parametrisches Entwerfen ablaufen kann. Ein klarer Beweis dafür sind die seit langer Zeit verwendeten Erweiterungen für AutoCAD® bei spezialisierten Unternehmen. Solche Lösungen schaffen bis heute Abhilfe bei der CAD-basierten Tragwerksplanung in den unkonventionellen Planungsbereichen.

Daraus lässt sich schließen, dass das Thema BIM für alle Sondertragwerke im Allgemeinen und für den Membranbaubereich im Besonderen schon lange Präsenz hat. Bei vielen Sondertragwerken wurde die BIM-Arbeitsmethode in einer aus heutiger Sicht unzureichenden Version verwendet, da die erfolgreiche Realisierung dieser Tragwerke in einem CAD-System fast unmöglich wäre.

Aus Sicht der Komplexitätsbeherrschung bei Bauprojekten wird bei der Verwendung parametrisch-assoziativer Vorgehensweisen die Kommunikation zwischen verschiedenen Planungsbeteiligten und der verbale Austausch von Informationen wichtiger denn je (Ihde 2018, S.61). Diese Tatsache rechtfertigt den vergrößerten Bedarf an Interoperabilität im Umgang mit den BIM-Werkzeugen.

Die für die Sondertragwerke spezialisierten Planungsunternehmen werden von der Bauherrenseite vertraglich verpflichtet, ihre Projekte in einer bestimmten Software abzuwickeln und abzugeben. Auch die Kompatibilität mit bestimmten Softwarepaketen für die Kostenberechnung und Bauablaufsimulation wird vertraglich vorbestimmt.

Noch ein wichtiger Aspekt ist die Internationalisierung der Planungsteams. Für immer anspruchsvoller werdende Projekte, auch leichte Flächentragwerke, ist dies besonders aktuell. Planungsbeteiligte arbeiten an einem Projekt, befinden sich aber an weit entfernten Standorten. Sie müssen zu jeder Zeit konsistente Daten haben und Änderungen miteinander in Echtzeit koordinieren können. Dementsprechend entsteht die Forderung nach mehr Werkzeugen für Kommunikation und Koordination. Hierfür könnte BIM unterstützend wirken.

Es gibt auch negative Meinungen zum Thema „BIM-Arbeitsmethode bei komplexen Flächentragwerken“. BIM sei zu stark genormt und gerade bei Flächentragwerken ist dies nicht erwünscht, da die Kreativität der Planer dadurch eingeschränkt wird (Lin, Roithmayr 2015, S.8). Zu stark genormte Bauteile aus den Katalogen von verschiedenen Klassifikationssystemen und Datenbanken mit Eigenschaften erleichtern zwar die Involvierung von Produktherstellern in den BIM-Prozess, geben aber unzureichende Variabilität für die Projektgestaltung in den früheren Entwurfsphasen.

Als Beweis für die unzureichende Ausnutzung der propagierten BIM-Potenziale lässt sich das Projekt des Olympiastadions in London erwähnen (Lin, Roithmayr 2015). Wie es in der Tabelle 1 in (Lin, Roithmayr 2015, S.97) dargestellt ist, ergaben die bei dem Projekt

erreichten BIM-Vorteile lediglich fünf aus den 16 Punkten gemäß BIM-Checkliste von (Eastman 2011). Ausgerechnet bei der Planung des Membrandaches des Stadions wurden viele Defizite aufgedeckt, wie zum Beispiel fehlende Interoperabilität zwischen Entwurfs-, Simulations- und FEA-Analysis-Software.

Am Schluss des Artikels kommen die Autoren zu der Meinung, dass Interoperabilität der Entwurfsprozesse für alle Arten der Gebäudeplanung (nicht nur für Membranarchitektur) immer noch eine große Herausforderung und Hauptgrund für die bisher nicht bewiesenen BIM-Vorteile ist.

Desweiteren sei für den allgemein langsameren Anpassungsprozess (der BIM-Werkzeuge an die Bedürfnisse des Membranbaus) die für die Membranbauplanung notwendige Synthese der Formfindung, statischen Analyse und Zuschnittsermittlung verantwortlich. Nach dem eingehenden Vergleich der zum Jahr 2015 vorhandenen Werkzeuge für automatisierte Membranbauplanung kommen Autoren zum Schluss, dass alle diese Werkzeuge dem BIM-Level-1 zugeordnet werden können.

Zusammenfassend lassen sich die aufgeführten Defizite bei der Planung des Olympiastadions in London mit BIM-Arbeitsmethode pauschal auf alle Sondertragwerke übertragen. Folglich bestätigt sich die Aktualität der weiteren Handlungen in Richtung der Anpassung der BIM-Arbeitsmethode für den Membranbaubereich.

Zusammenfassung der Erkenntnisse aus dem Abschnitt 1.2

Warum ist BIM für den Membranbau aktuell?

- Gemeinsamkeiten zwischen BIM-Vorteilen und Vorteilen aus der Verwendung des parametrischen Entwerfens (frühere Entscheidungsfindung, engere Kommunikation zwischen Disziplinen, Verschiebung des Aufwandes in die früheren Leistungsphasen);
- Natürliche Komplexität von Sondertragwerken (von ihrer Größe sowie von der architektonischen Kreativität) kann mit konventionellen Arbeitsweisen uneffizient bewältigt werden. Die Sondertragwerke werden immer komplexer, was ihre Architektur und Volumen angeht. Ihre effiziente Planung ist nur mit der BIM-Arbeitsmethode möglich;
- Anzahl der interagierenden Programme im Membranbau ist größer als in den anderen Planungsbereichen (wegen Formfindung und ggf. Simulationsbedarf);
- Produkthersteller können profitieren, wenn sie als zusätzliche Leistung die Bereitstellung von ihren Elementen garantieren (aber Anforderungen fehlen);
- BIM-Präsenz beim Membranbau wurde seit langem durch die AutoCAD-Erweiterungen gewährleistet, jedoch nur im begrenzten Umfang, da unzureichende Interoperabilität keine Interdisziplinarität ermöglichte;
- Bauherrenanforderungen (Forderung nach einer bestimmten BIM-Umgebung) bzw. gesetzliche Verpflichtung nehmen weltweit und für alle Bau-/Planungsbereiche zu;
- Internationalität der realisierten Vorhaben und Planungsteams im Membranbau;
- Das Risiko der Konkurrenzunfähigkeit unter den spezialisierten auf Sondertragwerken Unternehmen wegen Nichtverwendung von BIM;
- Zukünftige Effizienzsteigerung für Fertigung, Kostenermittlung und Bauablaufsimulation durch den BIM-Einsatz möglich;

Alle aufgeführten Punkte sprechen für die Notwendigkeit der andauernden Auseinandersetzung mit BIM-Anforderungen in allen Planungsbereichen, auch im Membranbau. Im Kapitel 3 wird ausführlicher auf die Herausforderungen im Membranbau gegenüber dem Massivbau und industriellem Stahlbau eingegangen.

1.3 Forschungsfragen

- **Inwieweit kann ein dreidimensionales Modell** unter Berücksichtigung aller dort enthaltenen semantischen Daten **weitergenutzt werden**? Wie konsistent können Daten weitergeleitet werden?
- **Wie lässt sich das Ablaufdiagramm der Planungsprozesse** bei Flächentragwerken durch die Verwendung des erarbeiteten Konzepts **optimieren**?
- **Welche Auswirkungen** hat das vorgestellte Konzept **auf den zeitlichen Ablauf** des Prozesses bei einem Flächentragwerk?
- **Lassen sich** durch die Verwendung des vorgestellten Konzepts **Auswirkungen auf die Fertigung** im Werk, den Bauprozess und weitere Nutzung besser **abschätzen**?
- **Lässt sich Zeitersparnis** bei der Verwendung des vorgeschlagenen Konzepts gegenüber konventionellen Arbeitsmethoden in Membranbauprojekten **abschätzen**?

1.4 Ziele der Arbeit

- Vergleich vorhandener Werkzeuge für den Aufbau eines Workflows für Flächentragwerke.
- Ausarbeitung eines geschlossenen Konzepts für BIM-basierte Entwurfsprozesse und Arbeitsmethoden unter Vorbedingung der Verwendung von Werkzeugen parametrisch-assoziativer Modellierung.
- Bewertung der Effizienz der gefundenen BIM-Arbeitsmethode und Formulierung von Fragen für weitere Forschung.
- Abbildung der wichtigsten Einzelschritte einer BIM-basierten Modellierung an einem konkreten Projekt aus dem Bereich Membranbau.
 - parametrischer Entwurf der Geometrie (Rhino3D[®], Grasshopper 3D[®])
 - Berücksichtigung und Implementierung aller Konstruktionselemente: Stahl, Seile, Glas, Membrane
 - Auswahl und Erweiterung der Schnittstelle nach RFEM für Strukturelemente und Flächengenerierung
 - Programmierung der Schnittstelle von RFEM nach Grasshopper 3D[®] für Übernahme der Querschnittsinformationen zur weiteren Bearbeitung oder Nutzung
 - Untersuchung der IFC Schnittstelle zum Aufbau des BIM Modells in Revit
 - Arbeiten mit Familien in Revit (Flächen als adaptive Familien)
 - Strukturierung und Überarbeitung des BIM-Modells in Revit und Allplan
 - Vergleich der Vorgehensweise in Revit und Allplan
 - Formulierung möglicher Wege zur Anbindung der Werkstattplanung

2 Grundlagen

Die Hauptidee des Kapitels ist die Erklärung der wichtigsten Definitionen, eine Zusammenfassung von zu berücksichtigenden Aspekten und die Verschärfung der Aufmerksamkeit zu den potenziellen Vorteilen und Hindernissen der BIM-Arbeitsmethode.

Das Verständnis von BIM hängt stark von den Interessen der jeweiligen Beteiligten ab. Folglich muss im Umgang mit BIM-geführten Projekten zuerst eine gemeinsame Sprache gefunden werden. Es gab bis vor kurzem keine Einigung über die grundlegenden BIM-Definitionen, die bei der allgemein anerkannten BIM-Umsetzung verwendet werden müssen. Eine schnelle Recherche der vorhandenen Literaturquellen liefert ungleiche gegebenfalls widersprüchliche Ergebnisse.

Erst seit der Ausarbeitung und Einführung von BIM-Normen in den jeweiligen Weltregionen geht der Prozess in Richtung einer Kompromissfindung. Die „Späte Mehrheit“ (hierfür wird auf die Abbildung 1.1, Seite 1 verwiesen) schaut zuerst auf die Vorreiterländer in der BIM-Einführung, bevor sie ihre eigenen Normen und Standards entwickeln. Darüber hinaus erfolgt eine Anpassung an die lokalen/regionalen Bedingungen, meistens mit Berücksichtigung etablierter länderspezifischer/regionalspezifischer Praxis.

In Deutschland wurde vom Verein der deutschen Ingenieure die Normenserie VDI 2552 entworfen, unter anderem auch zu den Begriffsdefinitionen (siehe dazu VDI 2552 Blatt 2 „BIM – Begriffe und Definitionen“).

Zu Komplikationen kann es aber dann führen, wenn an einem Projekt Planer aus verschiedenen Weltregionen arbeiten. Mögliche Lösungen wären dann entweder Festlegung konkreter Anforderungen inklusive Definitionen vom Bauherrn, oder die Übernahme von BIM-Normen des Landes, in dem das Vorhaben realisiert wird. Wie es im unteren Abschnitt 2.1.3 erläutert wird, können verschiedene Definitionen zu ernsthaften Problemen führen.¹

2.1 Grundlegende Definitionen

Die Behandlung aller vorkommenden Definitionen ist ein umfassendes Thema. Deswegen werden in diesem Unterabschnitt die drei meistverwendeten Begriffe behandelt: BIM, Reifegrad und im allgemeinen Sinne die LoX-Repräsentationsebenen (meistens als LoD, LoG und LoI bekannt).

¹Gemeint ist, dass letztendlich jemand entscheiden muss, welche BIM-Normen man verwendet werden müssen, und was jedem vordefinierten LoD konkret zugewiesen wird.

2.1.1 Semibegriff BIM

Obwohl der Begriff BIM schon lange Zeit ein absoluter Trend im Bauwesen ist, versteht jeder darunter oft spezifische Aspekte. Je nach Tätigkeitsbereich und Funktion eines Beteiligten im Projekt kann sich die darunter zu verstehende Definition unterscheiden.

Eine umfassende Definition wäre eine Zusammensetzung aus Modell, Modellierung, Methode und Management nach (Hausknecht, Liebich 2016, S.49).



Abbildung 2.1: Mehrdeutigkeit bei dem Akronym BIM

Quelle: in Anlehnung an (Hausknecht, Liebich 2016, S.49)

Basierend auf den unterschiedlichen Definitionen müssen beim jeweiligen BIM-Anwender folgende Bestandteile verinnerlicht werden:

- Modell - seine Eigenschaften allgemein und bezogen auf Membranbau
- Modellierung - Prozesse rund um das Modell
- Methode - Methode der Zusammenarbeit
- Management - Endziel des ganzen Projektes - Effizienzsteigerung bei der Nutzung des Bauobjektes

Von (Eastman 2011) wurde eine größere Vielseitigkeit definiert.

„BIM is used to describe tools, processes and technologies that are facilitated by digital, machine-readable documentation about a building, its performance, its planning, its construction, and later its operation.“

VDI 2552 Blatt 2 “BIM - Begriffe und Definitionen“ bietet folgende Definition an:

„Methode zur Planung, zur Ausführung und zum Betrieb von Bauwerken mit einem partnerschaftlichen Ansatz auf Grundlage einer zentrischen Bereitstellung von Informationen zur gemeinschaftlichen Nutzung“

2.1.2 BIM-Reifegrad

Um das Potenzial der BIM-Technologien in der Zugmembranarchitektur genau einschätzen zu können, ist es wichtig, außer Definitionen von BIM auch die Messungen der BIM-Reifegrade genau zu verstehen.

Das Konzept der Reifegrade wurde aus der Software-Industrie übernommen und ursprünglich dazu verwendet, die Fähigkeiten von Auftragnehmern für Softwareprojekte der Regierung zu bewerten (Es wurde für das „US Department of Defence“ entwickelt. (Hutchinson, Finnemore 2009, SS.576-583))

Dieses ursprüngliche Reifegradmodell ist für das Bauwesen ungeeignet. Deswegen wurden von verschiedenen Autoren unterschiedliche angepasste Reifegradmodelle eingeführt. Der Begriff BIM-Reifegrad wurde für die Baubranche von Mark Bew und Mervyn Richards 2008 formuliert und bezeichnet das Kompetenzenvermögen, das technische Niveau und die Vernetzungstiefe, die einem bestimmten Zustand auf dem Weg zu komplett digitalisierten Bau- und Planungsprozessen entsprechen (Abbildung 2.2).

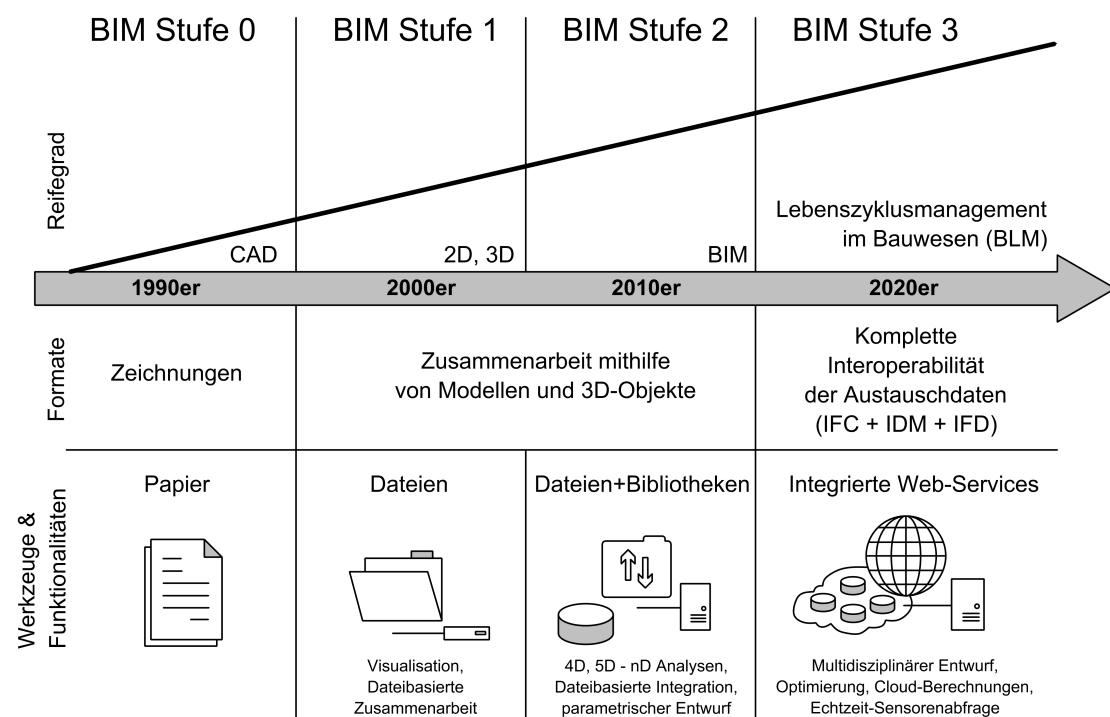


Abbildung 2.2: Darstellung der Reifegrade der Gebäudeinformationsmodellierung
Quelle: in Anlehnung an Abbildung 3 aus (Lin et al. 2015)

BIM Reifegrade werden durch den BIM Reifegrad Index gemessen, welcher je nach Autor vier oder fünf Stufen besitzen kann. Die in dieser Masterarbeit verwendete Grafik stützt sich auf das von Bew und Richards vorgeschlagene Modell. Von diesem ausgehend und

unter Berücksichtigung von verschiedenen anderen Reifegradmatrizen wurde eine allgemeine Synthese in (Lin et al. 2015) ausgearbeitet, die in der Abbildung 2.2 auf der Seite 18 dargestellt ist.

Die BIM-Reifegradmatrix wird hauptsächlich für zwei Zwecke verwendet:

1. Zur Beschreibung von Meilensteinen/Stufen bei der Umsetzung einer nationalen BIM-Strategie. Landesspezifisch wird diese Matrix angepasst.
2. Als Messkriterium bei der Bewertung von vorhandenen BIM-Werkzeugen.

Im letzten Fall wird die Abbildung 2.2 auf der Seite 18 in eine tabellarische Form umgewandelt und mit feineren Messkriterien versehen. Ein aufschlussreiches Beispiel lässt sich auf der Web-Seite <https://bimsource.de/bim-reifegrad/>² finden.

Mehrere Organisationen und Behörden bieten Leitlinien und Standards für die Messung der BIM-Reife in einem Unternehmen oder einem bestimmten Projekt, aber keine davon sind allumfassend³. Eindeutigkeit und Objektivität der dort enthaltenen Kriterien kann nur auf die Erfahrung des Autors zurückgeführt werden. Es empfiehlt sich dennoch eine eigene Analyse von Stärken und Schwächen von verfügbaren Reifegradmodellen.

Es muss eventuell in Zukunft auch ein Reifegradmesswerkzeug entwickelt werden, welches ein glaubwürdiges Bewertungssystem enthält, alle relevanten BIM-Kennzahlen messen kann und über verschiedene Disziplinen angewandt werden kann. Eine anerkannte Zertifizierung wäre nur mit einem solchen Werkzeug möglich. Aufgrund der großer Vielfalt verwendeter Modelle, Matrizen und Kriterien ist eine objektive und unabhängige Bewertung zurzeit unrealistisch.

2.1.3 LoX

Der Titel „LoX“ soll auf die Vielseitigkeit der im Weiteren behandelten Begrifflichkeiten hinweisen. An Stelle von X können verschiedene Buchstaben stehen und dadurch eine breite Varianz herausbilden.

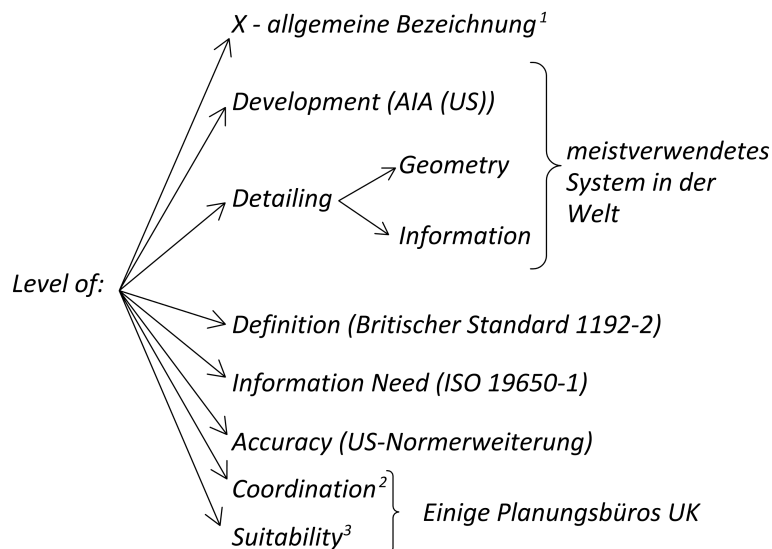
Bei den Begriffsdefinitionen LOD, LOG und LOI steckt zwar nichts Schwieriges dahinter, aber man ist oft über ihre Vielfalt verwirrt. Diese Vielfalt bezieht sich auf die geschichtliche Entwicklung und auf länderspezifische Gepflogenheiten.

²Zum direkten Herunterladen unter <http://bit.ly/2d19GIM> (Abgerufen am 25.06.2019)

³Die Pennsylvania State University hat beispielsweise das „Organizational BIM Assessment“ entwickelt, das die BIM-Reife basierend auf Strategie, Prozess, Informationen, Infrastruktur und Personal misst. Alternativ bietet der National BIM Standard (NBIMS) ein Capability Maturity Model (CMM) für Interessengruppen an, um die aktuelle BIM-Implementierungsleistung darzustellen und zukünftige BIM-Implementierungsziele zu planen. Es gibt auch einige webbasierte BIM-Leistungsbewertungsinstrumente, wie bimSCORE.

Eine übersichtliche kurzgefasste Geschichte der Definitionsentwicklung (LOD/LOI/LOG bis 2015) lässt sich in (Hausknecht, Liebich 2016, SS.134-137) finden. Da wird unter anderem auf ihre Differenzen eingegangen.

„Trockene“ Definitionszusammenstellung mit dem Verwendungsraum kann der Abbildung 2.3 entnommen werden.



¹ LOX ist Teil der vom CEN Technical Committee herausgegebenen Norm TC 442 Building information Modeling (BIM) .

² Der LoC gibt an, inwieweit ein Objekt mit den Anforderungen anderer Gewerke abgeglichen ist. Ist ein Objekt kollisionsfrei, barrierefrei, montage- und wartungsfähig?

³ Der LoS soll angeben, inwieweit ein Objekt seinem vorgegebenen Verwendungszweck entspricht.

Abbildung 2.3: Überblick über die vorkommende LoX-Definitionen

Zu den Zielen, die verschiedene Systeme setzen, gehören unter anderem:

- Kostenberechnung nach in jeglichem Land geltenden Kostengruppen
- Rechnerkapazitäten (effizientere Verarbeitung von großen Datenmengen)
- Zustandsabbildung (Montagezustand, Endzustand, Renovierung, Abbau)
- Entwicklung der Bauteilelemente über die Zeit (Ablaufplanung)
- Interdisziplinäre Arbeit nach gleichen Kriterien (Anforderung „So viel Objekteigenschaften in jeder Leistungsphase wie nötig“)

Eine umfassende geschichtliche Analyse und Vergleich liefert der frei zugängliche Beitrag von Marzia Bolpagni⁴. Unter anderem findet man im Beitrag von Bolpagni eine län-

⁴Marzia Bolpagni. Viele Facetten von LOD. Unter dem Link <https://www.bimthinkspace.com/2016/07/the-many-faces-of-lod.html> (Abgerufen am 25.06.2019)

derübergreifende Gegenüberstellung von LoD-Skalen. In Bezug zueinander angeordnete Skalenbereiche liefern einen anschaulichen Überblick, wie sich nationale und unternehmensspezifische LoD-Stufen unterscheiden.

Britische CIC-Stufe	UK LoD (PAS 1192-2)	US LoD (AIA)
Stufe 0: strategische Definition	LoD 0	LoD 0
Stufe 1: Vorbereitung und Grobplanung	LoD 1	LoD 0
Stufe 2: Vorplanung	LoD 2	LoD 100
Stufe 3: Bauplanung	LoD 3	LoD 200
Stufe 4: technische Planung	LoD 4	LoD 300
Stufe 5: Bauausführung	LoD 5	LoD 400
Stufe 6: Übergabe	LoD 6	LoD 500
Stufe 7: betriebliche Nutzung	LoD 7	LoD 500

Abbildung 2.4: LoD nach britischer Norm im Verhältnis zu den amerikanischen AIA-Vorgaben

Quelle: Aus (Baldwin et al. 2018, S.37) übernommen

Am Beispiel des Begriffs Level of „D“ (LoD) wird es ersichtlich, wie unterschiedliche Definitionen zu den Verständnisproblemen zwischen Beteiligten aus verschiedenen Disziplinen führen können. Die zwei wichtigsten und meistverbreitesten Definitionen sind Fertigstellungsgrad und Detaillierungsgrad, Abbildung 2.5 auf der Seite 22.

Level of Definition (Definitionsgrad) heißt der Begriff aus dem britischen Standard BS 1192-2. Dieser führt zu einer größeren Verwirrung bei der LoD-Nomenklatur. Nach der Einführung der neuen Norm ISO 19650 im Dezember 2018 gilt eine neue, vom britischen Standard unabhängige LoD-Nomenklatur. Das dort definierte Level of Information Need (LoIN) wurde schon vorher in einigen internationalen BIM-Standards festgelegt, blieb allerdings nicht verbreitet in Gebrauch.

Es sollte angemerkt sein, dass verschiedene Unternehmen aus dem gleichen Staat ihre spezifische von der (gültigen) Norm abhängigen Standards festlegen können. Bei interna-

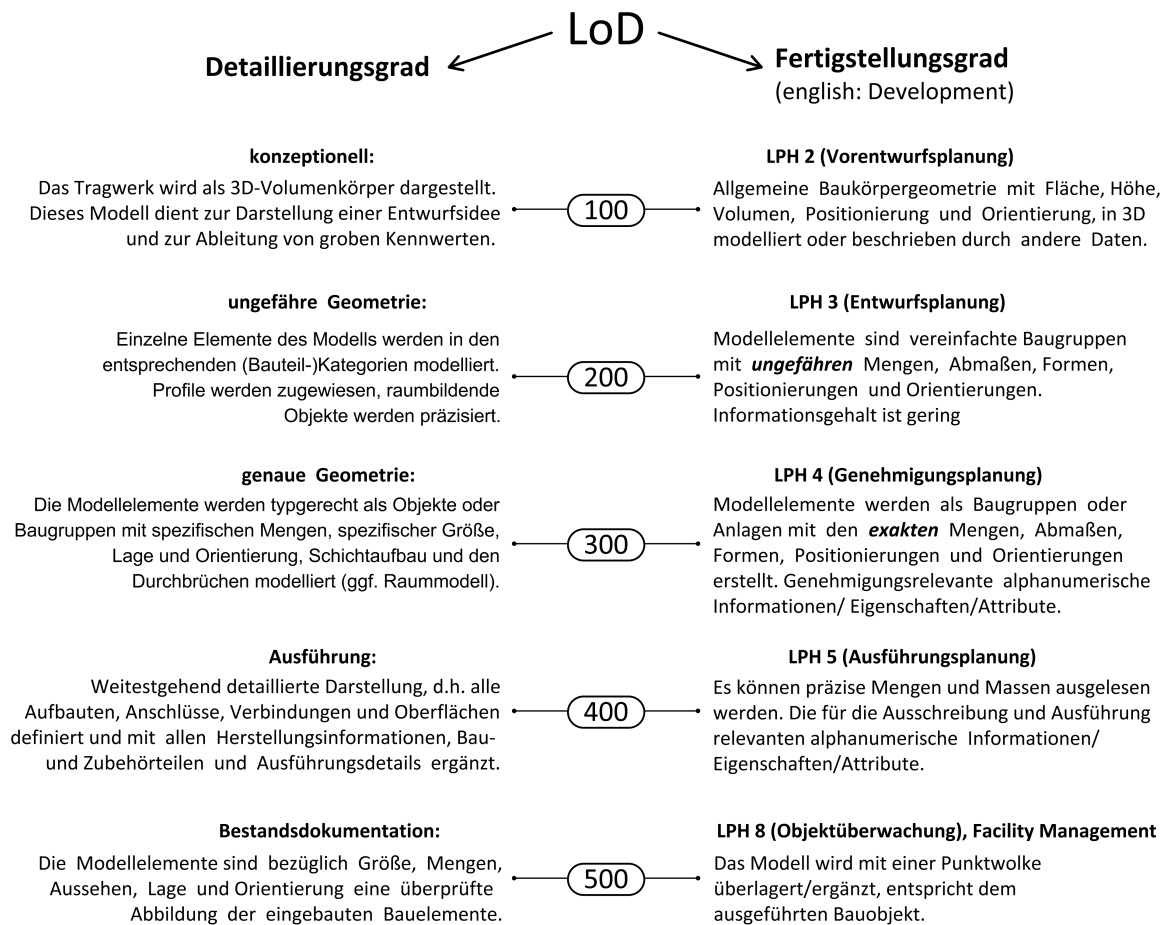


Abbildung 2.5: Terminologische Diskrepanz möglicher LoD-Definitionen

tionalen ISO-Normen wurde diese Tatsache berücksichtigt, um die notwendige Akzeptanz ihrer Regeldokumente zu erreichen. Dies ist auch einer der Gründe für die Festlegung in ISO 19650 von LoIN - Level of Information Need.

Neben der schon erwähnten Diskrepanz in der Konnotationseigenschaft bei gleichnamigen Akronymen (LoD) existieren zwei weitere Problemstellen bei ihrer Verwendung. Zum einen gibt es keine Expertensysteme, die eine automatisierte oder halbautomatische Verifikation und Validierung der Modellbauteile bezüglich implementierter LoX durchführen können. Zum zweiten wird uneinheitliche LoX-Standardisierung als eine große Hürde für die Produkthersteller angesehen. Denn die Hersteller brauchen einheitliche Definitionen für eine gerechte Konkurrenz auf dem globalen Markt (Glockner 2016).

2.2 Interne Rahmenbedingungen (BIM-Niveau auf Unternehmensebene)

Zu den internen Rahmenbedingungen zählen die vom jeweiligen Unternehmen individuell festgelegten Richtlinien. Im Unterschied zu den früher beschriebenen Reifegraden sind sie kein Bestandteil einer nationalen BIM-Strategie. Auch einheitliche Standards auf territorialer Ebene werden davon nicht berührt.

Der Fokus ist auf die Art und Weise der Realisierung der von Auftraggebern gestellten Anforderungen verschoben. Viele kleinere Unternehmen mit einer langen Geschichte zeichnen sich durch zwei charakteristische Eigenschaften aus:

- Expertenwissen wird meistens bei den hocherfahrenen älteren Mitarbeitern angesammelt.
- Operative finanzielle Ressourcen sind begrenzt, was bei kleineren Büros öfter der Fall ist.

Diese Tatsachen führen zu unzureichender Flexibilität bei solchen Veränderungen wie der BIM-Einführung. Die Übergangsperiode dauert bei diesen Büros länger als bei den großen Konzernen, welche in der Praxis eine getrennte (Extra-)Abteilung organisieren können, um dort bestimmte Pilotprojekte durchzusetzen.

Aus diesen zwei Aspekten resultieren entsprechende Varianten der Organisation des Planungsprozesses in der Übergangsphase, welche im Abschnitt 2.2.1 näher erläutert werden.

Die effiziente BIM-Umsetzung ist meistens das Ergebnis einer langen Vorbereitungsphase, die sich für die späteren Phasen auszahlt. Außerdem wird in (Lin et al. 2015) auf die Kompetenz der Anwender, Planungsteams und Unternehmen als ein wichtiges Kriterium der erfolgreichen BIM-Umsetzung verwiesen:

„These varying BIM assessment matrixes indicate that the successful implementation of BIM relies not only on the tools and technologies used, but also on the competency of users, teams, and the organization.“

Zum Kompetenzaufbau werden sowohl Schulungen und Workshops verwendet, als auch eine ganze Reihe von Maßnahmen, die die Konzentration der Teammitglieder auf den Umbauprozess bei ihren praktischen Aufgaben fördern. Die Beherrschung neuer Arbeitsmethoden parallel zur Ausübung vorhandener zu betreuender Projekte, die in konventioneller Arbeitsweise geführt werden, gehört zu falschen organisatorischen Rahmenbedingungen und führt zu Effizienzabnahme im Schulungsprozess (Baldwin et al. 2018, S.137).

Neben dem Aufbau der notwendigen Kompetenzen wird die BIM-Arbeitsmethode an die Bedingungen bei einem konkreten Unternehmen angepasst. Zu den allerersten Dokumenten gehört ein BIM-Prozessablaufplan (Auch als Prozessdiagramm bezeichnet⁵) mit Bezug zu den vom Auftraggeber gestellten Informationsanforderungen und dem an ein konkretes Projekt abgestimmten/angepassten BIM-Abwicklungsplan⁶.

Die Ausarbeitung eines BIM-Abwicklungsplans hängt von den in einem bestimmten Planungsbüro verarbeiteten Projekttypen und von den vorher etablierten Werkzeugen und Standards/Richtlinien ab. Wenn z.B. eine Erweiterung für AutoCAD® die gestellten Anforderungen erfüllt, dann muss neue Software zumindest auf gleichem Niveau liegen und keiner analogen Erweiterung bedürfen.

Der Prozessablaufplan ist ein wichtiger Bestandteil für den Kommunikationsaufbau und das Projektmanagement. Ein mögliches konzeptionelles Beispiel für die Gestaltung eines solchen Ablaufplans ist auf der Abbildung 2.6 auf der Seite 25) dargestellt.

2.2.1 Von Closed-little-BIM zu Open-BIG-BIM

Es empfiehlt sich, jegliche neue Arbeitsmethoden, nicht nur BIM-Methoden, zuerst auf der Projektebene statt auf Unternehmensebene zu implementieren. Dafür eignet sich der sogenannte little-BIM-Ansatz. Das Präfix „klein“/„little“ sollte vermitteln, dass die vordefinierten BIM-Ziele und Anwendungsfälle auf einen (einzigen) Anwender reduziert sind. Dies bedeutet wiederum die Ausnutzung der BIM-Vorteile nur lokal bei einem Fachplaner in seiner Fachdisziplin.

Ein alternativer little-BIM-Ansatz beschränkt BIM auf wenige Mitarbeiter eines (meistens kleinen) Planungsbüros. Der jeweilige Planer setzt die für ihn persönlich effizienzfördernden Werkzeuge entsprechend seiner Wertschöpfungskette ein. Die kollaborativen BIM-Aspekte werden aber in diesem Fall weiterhin ausgenommen (Baldwin et al. 2018, SS.12-13). Nachdem jeder Fachplaner seine konkreten Werkzeuge und Verfahren zur Profitierung von der BIM-Nutzung gefunden hat, kann der Übergang zum BIG-BIM-Modell schrittweise erfolgen.

Dafür wird eine weitere Begrifflichkeit von Interesse, nämlich Open- bzw. Closed-BIM. Mit der angetriebenen Verbreitung offener Austauschformate, wie es bei IFC der Fall ist, verschwindet allmählich die Grenze zwischen Open- und Closed-BIM. Closed-BIM wird zwar grundsätzlich korrekt als eine Einschränkung von den Projektbeteiligten bei

⁵Das Prozessdiagramm setzt sich aus Informationen bezüglich Prozessnamen, Prozessressourcen, Prozessabfolgen, benötigte Vorleistungen (Input) und zur Verfügung gestellte Ergebnisse (Output) sowie Einflussfaktoren zusammen.

⁶Plan für die BIM-Umsetzung, um die BIM-Projekt-Spezifikationen zu erfüllen; Definition der Aufgaben, Rollen, Prozesse und Ergebnisse (immer auf ein bestimmtes Projekt bezogen)

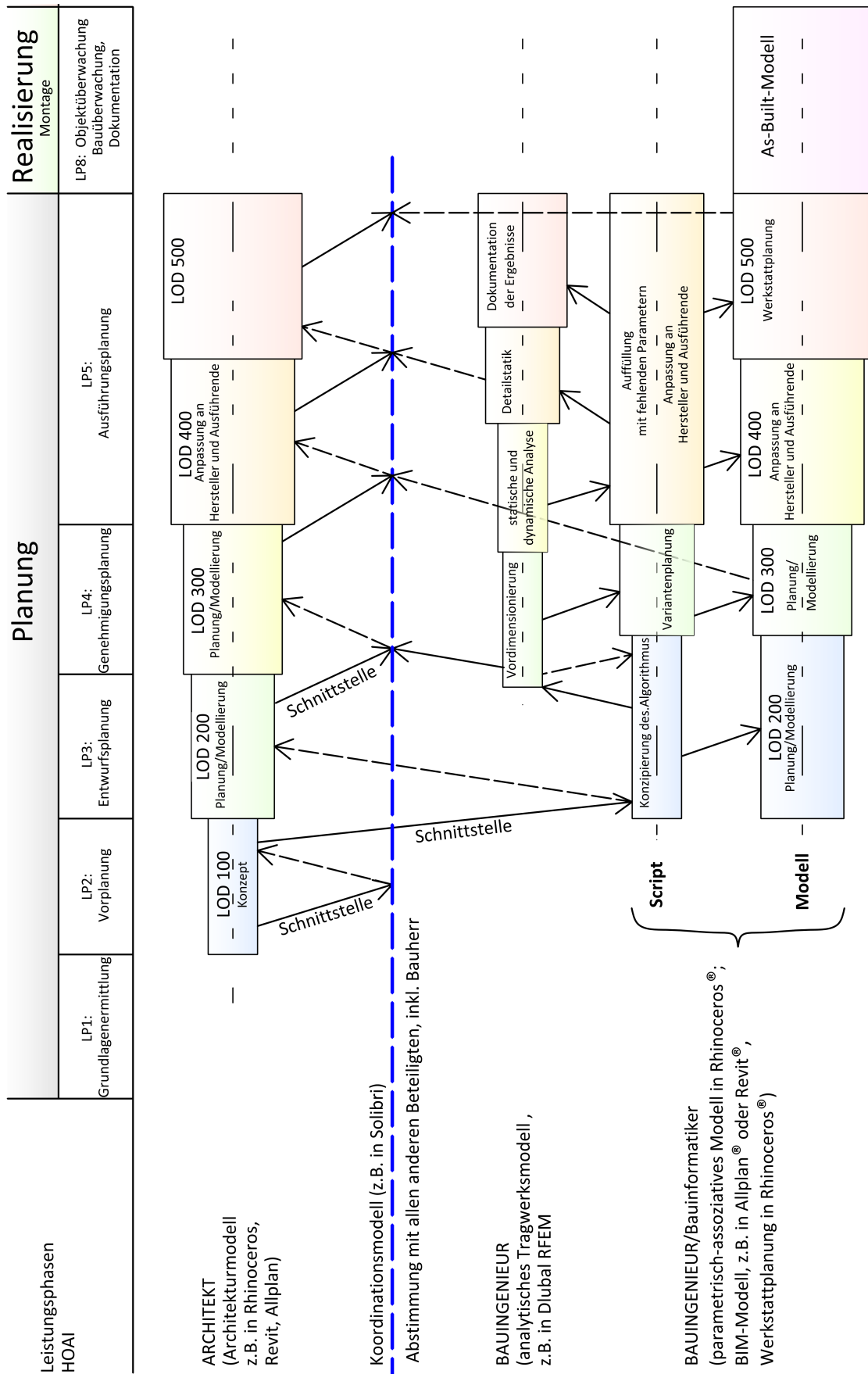


Abbildung 2.6: Austauschketten zwischen BIM-Projektteilnehmern

Quelle: in Anlehnung an (Flury 2015, S.22)

ihrer Softwarewahl gesehen, war aber historisch ein unerlässlicher Schritt zur Erschließung aller potenziellen, propagierten BIM-Vorteile. Durch die Verwendung von ursprünglich in sich geschlossenen Programmen konnte der Nutzen aus der Zusammenarbeit innerhalb einer Abteilung/eines Planungsteams im vollen Umfang ausgekostet werden. Darüber hinaus diente der Closed-BIM-Ansatz einem besseren Schutz des Eigentums jeweiliger Unternehmen.

Ein allgemeiner Trend vollzieht sich in Richtung überall eingebetteter Funktionalitäten zum IFC-Austausch. Auch IFC-Spezifikation wird intensiver denn je erweitert. Daraus lässt sich schließen, dass der Closed-BIM-Ansatz in der nahen Zukunft der Vergangenheit angehören wird (abgesehen von dem ungelösten Problem des Eigentumsschutzes bei IFC-Format). Angesichts der Entwicklung zur Verbreiterung des Open-BIM-Ansatzes verliert dadurch die little-BIM-Methode nicht an ihrer Einsatzfähigkeit. Dies bedeutet mehr Flexibilität bei der Werkzeugwahl mit der gleichzeitigen Erhaltung geforderter Übertragungsqualität durch den IFC-Austausch. Der gewünschte Endzustand bleibt auf lange Sicht die Arbeitsorganisation nach open-BIG-BIM Prinzip. Denn dieser Zustand ist für die Erreichung einer geschlossenen BIM-Arbeitskette und im Weiteren des Reifegrads 3 unumgänglich (Baldwin et al. 2018, S.14).

Aber als Übergangszustand wählt man oft den little-BIM-Ansatz. Dies erlaubt, den Aufwand und die Unkosten über die Zeit gleichmäßig zu verteilen, sodass Wissen und Fähigkeiten systematischer und strukturierter angeeignet werden. Der Weg zu der open-BIG-BIM-Arbeitsmethode kann neben ihrer direkten Umsetzung im Rahmen einer autonomen Planungsabteilung auch durch zwei Umwege beschrieben werden. Hierfür verweise ich auf die Abbildung 2.7

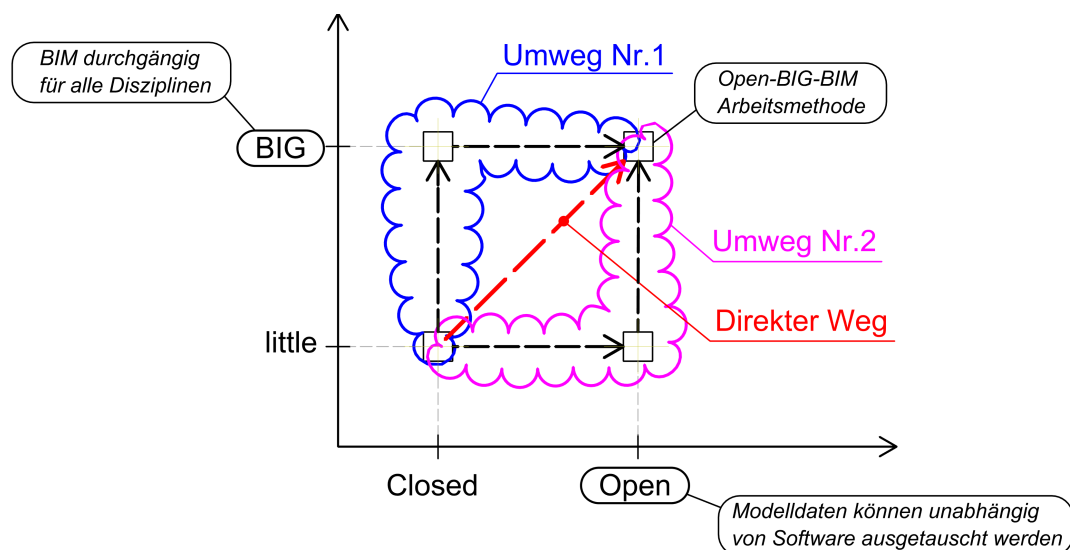


Abbildung 2.7: Mögliche Wege von Closed-little-BIM zu Open-BIG-BIM-Arbeitsmethode

Die möglichen Gründe für einen indirekten Umweg Nr.1 oder Umweg Nr.2 liegen in der natürlichen Entwicklung eines Unternehmens:

- Knappe finanzielle Ressourcen für den Ausbau interner Infrastruktur (Hardware und Software)
- Alte Projekte wurden in konventionellen Arbeitsmethoden angelegt oder die Zusammenarbeit erfolgt mit Partnern, die keinen BIM-geführten Planungsprozess unterstützen können.
- Menschlicher Faktor:
 - fehlende Kompetenzen und als Folge Mitarbeiterausfall wegen Schulungen bzw. Weiterbildung
 - Expertenwissen wurde von den früheren Generationen in 2D-Form angesammelt und muss für die Weiternutzung von den kompetenten Mitarbeitern in digitaler Form überarbeitet werden.

Zur abschließenden Veranschaulichung möglicher Konstellationen im BIM-Arbeitsumfeld wird auf die Abbildung 2.8 verwiesen.

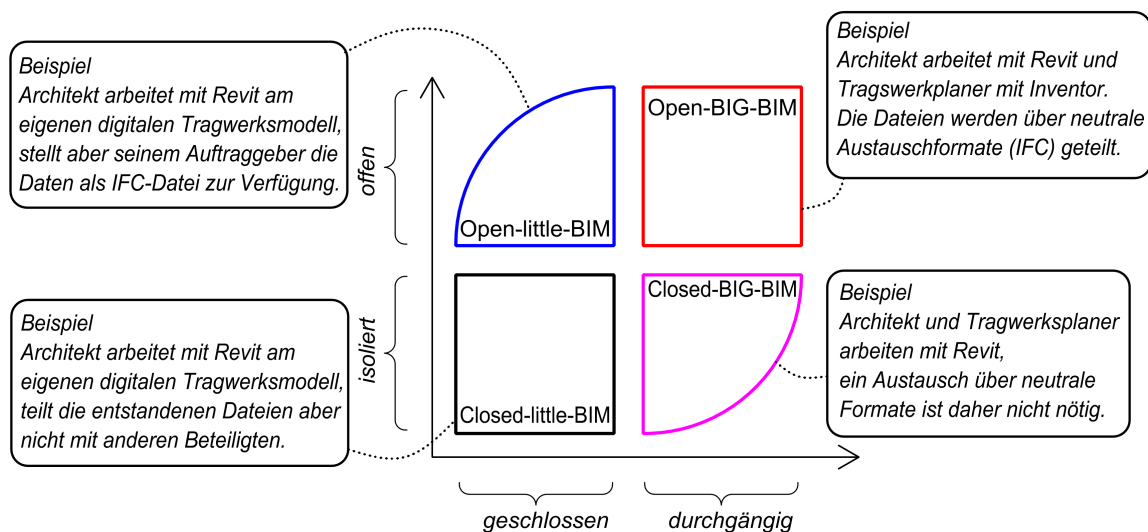


Abbildung 2.8: Fallbeispiele zu den vier Arbeitsprinzipien

2.3 Chancen und Risiken

Im Allgemeinen lässt sich sagen, dass in der Baubranche eine überwiegend positive Betrachtung der BIM-Thematik vorherrscht. Langfristig gesehen besteht kein Zweifel in der Etablierung dieser Methode. Gleichzeitig muss BIM einer kritischen Analyse unterzogen werden und die potenziellen Vorteile müssen herausgearbeitet werden. In diesem Abschnitt wird der Versuch unternommen, die wesentlichsten Chancen und Risiken des BIM-Einsatzes in Unternehmen und Projekten basierend auf den vorhandenen Publikationen gegenüber zu stellen.

Prozesse statt Software

Das Risiko besteht in der falschen Prioritätensetzung. Dabei wird der Fokus auf Software statt auf die Prozesskette und standardisierte Verantwortungsverteilung verschoben. Ein Forschungsprojekt an der Universität Wuppertal, 2017 bestätigt die Hypothese, dass der Prozessgestaltung eine wichtigere Rolle als der Software zukommt (Helmus et al. 2018)

„Um das sogenannte „BIG open BIM“ zu erzielen, welches ein ganzheitliches Arbeiten über alle Fachdisziplinen hinweg an einem Datenmodell vorsieht, ist nicht mehr die Software die entscheidende Hürde, sondern vor allem fehlende Standards und geänderte Prozesse sowie die fehlende Rechtssicherheit.“

Chance hieraus

Bei einer geschlossenen und durchgedachten BIM-Wertschöpfungskette wird Zeitersparnis erreicht, denn die Daten werden verlustfrei übergeben und Projektbeteiligte haben qualitativ hochwertigere Grundlagen für die Kommunikation (Konsistente Geometrie und Attribute im Modell).

Verantwortungsdiffusion

Verantwortungsdiffusion entsteht, wenn auf ein gemeinsames Modell zugegriffen wird (1) oder die Verantwortungsbereiche in der BIM-Umgebung nicht klar definiert sind (2). Diese Meinung wird durch (Baldwin et al. 2018) unterstützt:

„Das Management von BIM-Projekten gleicht dem von traditionellen Projekten in der Hinsicht, dass es für alle Arbeitsbereiche bzw. Gewerke sowohl interne, sozusagen hinter verschlossenen BIM-Türen ablaufende Arbeitsabschnitte als auch zu vorher festgelegten Zeitpunkten stattfindende Informationstransfers oder Datenabgabe-Termine gibt. Auf diese Weise lässt es sich viel besser arbeiten als in einem ideologiegelastigen Projektnebel, in dem nicht

eindeutig definiert ist, welche Bereiche / Gewerke für welche Inhalte verantwortlich sind.“

Zum einen hat man mehr Ordnung bei der Verfolgung einzelner Planer und ihrer Verantwortungsbereiche im Modell. Zum anderen entsteht Bedarf an einem hochkompetenten Management, um diese Zuordnung technisch abgestimmt und das Verteilungssystem systematisch korrekt zu entwickeln.

Risiken und Chancen für die Tragwerksplanung (inkl. Berechnung)

Im Laufe des letzten Jahrzehnts lässt sich der tendenzielle Aufstieg von Vorträgen und Publikationen zum Thema „Berechnungen am Gesamtmodell“ beobachten ((Bletzinger 2014), (Meschke 2017), (Beer 2011)). Es wird immer mehr Sorge um das allgemeine Verständnis des Tragverhaltens bei komplexen Tragwerken geäußert.

Der zunehmende Einsatz der BIM-Modelle als Grundlage für die Erstellung der Berechnungsmodelle verstärkt das Risiko, dass sich der Tragwerksplaner weniger Gedanken über die Modellplausibilität machen wird. Die neuentwickelten Automatismen zur Überführung eines architektonischen Modells in ein analytisches tragen zu der Anhäufung beängstigender Fallbeispiele bei Prüfingenieuren bei.

Nach (Bletzinger 2014, S.48-57) führen die Berechnungen am Gesamtmodell zu einem schlechteren Verständnis der Zusammenhänge zwischen auswirkenden Faktoren und einer Verschlechterung der Lesbarkeit von Berechnungsergebnissen. Eine weitere Meinung aus (Bletzinger 2014, S.48) betrifft die Berechnungen an Gesamtmodellen im Sinne der Bereitstellung der Daten mithilfe von algorithmischen Methoden:

*„Die Anforderungen an Kontrollen und Qualitätssicherungen sind insofern in besonderem Maße zu stellen, als die Anschaulichkeit verloren geht und **algorithmische Bemessungen** als eher untauglich empfunden werden, um derartige Modelle [„komplexe Gesamtmodelle“] zur Bemessung heranzuziehen.“*

Daraus lässt sich schließen, dass Prüfungsbedarf und Plausibilitätskontrollen besonders an Bedeutung zunehmen, wenn man über eine skriptbasierte Vorgehensweise die Modelle aufbereitet.

Andererseits sollte BIM zu einer früheren Aufdeckung von fehlerbehafteten Modellelementen führen, da die Visualisierung und die speziellen Erweiterungen für die automatische Regelkontrolle zur Hilfe gezogen werden können. BIM wird zwar als hilfreich bei „hochkomplexen Bauvorhaben“ angesehen, aber nur wenn weiterhin die Hoheit des Ingenieurs in der Tragwerksplanung gilt (Fuchs et al. 2013, S.625).

Die praktisch tätigen Tragwerksplaner sind der Meinung, dass mehr Funktionalitäten für die Integration der Berechnungsmodelle in die BIM-Umgebung entwickelt werden sollten (Jungwirth et al. 2015, S.73),(Nöldgen et al. 2014, S.256).

Gleichstellung der Planungsbüros

Aufgrund der zurzeit hohen Kostenausgaben und zeitlichen Investitionen bringt BIM für kleinere Planungsbüros mehr Risiken als für die großen. Die Konkurrenzfähigkeit von kleinen Planungsbüros wird nach Meinung der Fachleute abgeschwächt (Holtschmidt 2018).

„Die sich abzeichnende Nachfrage nach Projekten, die unter Anwendung der Methode BIM umgesetzt werden sollen, lässt durchaus eine gewisse Marktbereinigung erwarten. Die konsequente Anwendung der Methode BIM erfordert einen nicht unerheblichen technischen und personellen Aufwand, der nicht von jedem kleineren Architekturbüro erbracht werden kann – auch wegen des möglichen honorartechnischen Ausgleichs.“

„Grundsätzlich ist BIM als Projektmanagementmethode für jedes Projekt anwendbar. Ob sich der Einsatz von BIM bei sehr kleinen Projekten jedoch lohnt, ist fraglich. Hier begrenzt sicherlich der nicht unerhebliche technische Aufwand den Einsatz.“

Entscheidungsfindung in frühen Entwurfsphasen

Die Verschiebung des Planungsaufwandes in die frühen Leistungsphasen durch BIM-Einsatz führt zu Mehraufwand bei der Entscheidungsfindung und zum Bedarf von diesen Prozess unterstützenden Werkzeugen und Methoden. Ein mögliches Werkzeug stellt hierfür der parametrisch-assoziative Entwurf dar. Dessen Verwendung in Verbindung mit der BIM-Methode führt zu ihrer gemeinsamen Synergie. Dadurch wird das Risiko der Überbelastung durch die kriterienreiche Analyse von optimalen Lösungen eliminiert (Steinegger 2015, S.63)

Interoperabilität

Die größten Potenziale, aber auch die größten Herausforderungen, stellen Funktionalitäten zur verlustfreien und sicheren Datenübergabe dar. Die immer breiter werdende Palette an Anforderungen verschiedener Projektteilnehmer führt zu den zahlreichen Iterationsschleifen auf dem Weg zu einem möglichst universellerem Austauschformat. (Dabei

wurde dem IFC-Format⁷ der Vorrang gegeben) Der IFC-Standard basiert auf offener und frei zugänglicher Spezifikation. Der Aufwand wird sich bestimmt in der langen Periode auszahlen, wenn alle Baubereiche und alle Anforderungen abgedeckt werden.

Bei der gegebenen unzureichenden Interoperabilität oder deren Qualität muss nach anderen Einflussmöglichkeiten gesucht werden. Eine alternative Variante ist der Austausch durch eine direkte API-Anbindung⁸. Die Flexibilität und Anpassbarkeit solcher Konzepte bleibt zurzeit etwas höher als bei der IFC-Variante. Da die Voraussetzung für die Verwendung direkter Schnittstellen jedoch nach wie vor hohe Ingenieurkompetenz bleibt, werden die in die jeweiligen BIM-Umgebungen implementierten IFC-Schnittstellen langfristig gesehen als bevorzugte Lösung erachtet.

Somit lässt sich schließen, dass das Risiko der unzureichenden Interoperabilität nur für in sich geschlossene, nicht weiterentwickelte BIM-Umgebungen zutrifft. Innovative und zu den Experimenten offene Umgebungen geben die in ihren Ausbau investierte Zeit zurück und stellen ihren Endanwendern den Mehrwert bei der BIM-Arbeitsmethode zur Verfügung.

Mit dem Ausbau von IFC erhöht sich auch die Anzahl der Einstellungen und gleichzeitig steigt das Risiko der Dateninkonsistenz für Anwender mit niedrigem Kompetenzenvermögen.

Fachkräfte

Durch den BIM-Einsatz in Planungsbüros und Projekten entstehen Chancen, hochmotivierte, innovationsfreudige Ingenieure anzulocken und ein verstärktes konkurrenzfähiges Team aufzubauen. Gleichzeitig bringt der Einsatz die Gefahr einer erhöhten psychischen Belastung bei den bestehenden Teammitgliedern (wegen der Anzahl von zu berücksichtigenden BIM-Aspekten).

Im großen Ganzen lässt sich sagen, dass sich der Fachkräftemangel verschärfen wird, da die neu entstandenen Rollen, wie BIM-Manager oder BIM-Koordinator einen erfahrenen Experten bedürfen. Die unzureichende Verfügbarkeit von mit der BIM-Arbeitsmethode vertrauten Menschen wird auch in der gegenwärtigen Ingenieurpraxis wiedergespiegelt (Ihde 2018, S.6). Auch wenn eigener Bedarf an Spezialisten befriedigt würde, können solche Defizite bei Projektpartnern als Bremsmechanismus für das Gesamtsystem wirken. Denn der Erfolg des BIM-Projektes liegt viel mehr an der Zusammenarbeit aller

⁷IFC – Industry Foundation Classes ist ein offener Standard zur digitalen Beschreibung von Gebäude-modellen mittels EXPRESS-Programmiersprache

⁸API (auch Anwendungsschnittstelle), (von englisch *application programming interface*), ist ein Programmteil, der von einem Softwaresystem anderen Programmen zur Anbindung an das System zur Verfügung gestellt wird. <https://de.wikipedia.org/wiki/Programmierschnittstelle>

Beteiligten, als an den ausgewählten BIM-Experten im eigenen Haus.

Ein weiteres Risiko entsteht in Verbindung mit Fachkräftemangel, falls es sich um hochkomplexe und lang andauernde Projekte handelt, wie zum Beispiel Flughäfen oder öffentliche Gebäude mit besonderer Architektur. Muss aus den bestimmten Gründen ein(e) Mitarbeiter(in) seinen Wohnort und seine entsprechende Arbeitsstelle wechseln, verbirgt sich die Gefahr der Entstehung einer Lücke im Projekt und ggf. Zeitdruck. Die vertragliche Bindung der hochqualifizierten Mitarbeiter wurde zum Beispiel im Schlussbericht des Forschungsprojekts „Die Auswirkungen von Building Information Modeling (BIM) auf die Leistungsbilder und Vergütungsstruktur für Architekten und Ingenieure sowie auf die Vertragsgestaltung“ als eine mögliche Lösung angegeben (Liebich et al. 2011, S.27).

Ausfall eines hochqualifizierten Mitarbeiters (zum Beispiel aus gesundheitlichen Gründen) führt auch zu Frustration unter den Projektpartnern und -kollegen, falls diese nicht gleichwertige Fähigkeiten und Kenntnisse im Umgang mit den bestimmten Werkzeugen haben.

Für die Weiterbildung bestehender Fachkräfte sollte Werkzeugbeherrschung und Orientierung in immer wachsender Menge an Funktionalitäten als Haupthilfsmittel empfohlen werden. Das ist der Kern sogenannter BIM-Kenntnisse. Gefolgt von der Beherrschung neuer Methoden der Zusammenarbeit werden diese besonders gut verinnerlicht.

Kontinuierliche Modellaktualisierung und Datenversionierung

Integrale Planung wird von allen gefordert, um Fehleranfälligkeit beim Planen zu reduzieren. Änderungsschleifen verkomplizieren den Planungsprozess und stellen somit ein Risiko dar. In Verbindung mit BIM-Prozessen erscheinen folgende Änderungstypen als risikobehaftet:

- bauherrinizierte Änderungen,
- Softwareversionserneuerungen,
- Abstimmungsänderungen,
- Hersteller sind nicht definiert (Datenlücken),
- Mehrvarianz bei konstruktiven Lösungen (Ihrer Realisierbarkeit), Normen/Richtlinien-Änderungen.

Diesen Risiken möchte man vor allem technisch vorbeugen, sodass ständige Änderungen und Versionierung keine Herausforderung mehr darstellen werden. Dazu eignen sich am besten Methoden der Komplexitätsbeherrschung, wie zum Beispiel „Systems Engineering“-Methoden oder die Graphentheorie (Ihde 2018).

Aufteilung der Planungsleistungen

Die Aufteilung der Planungsleistungen zwischen mehreren Büros führt zu ungerechter Verteilung des Aufwandes. In früheren Leistungsphasen muss man mehr tun, als in späteren, was auch mit HOAI-Vorschriften nicht übereinstimmt.

Negative Folgen bei der zweistufigen Beauftragung von Planungsleistungen.

Wenn alle Beteiligten in den früheren Planungsphasen (besonders Tragwerksplaner) einbezogen wurden, und der Bauherr beauftragt lediglich Leistungsphasen 1 bis 4 und die Ausführungsplanung wird anschließend jedoch an ein anderes Planungsbüro vergeben, bedeutet das, dass ein ausführlich in früheren Phasen durchdachtes Projekt, seinen tatsächlichen Autoren keinen Gewinn mehr in der Ausführungsplanung bringt (besonders gefährlich bei kleineren Planungsbüros) (Mittelstädt 2006, SS.145-158). Hierfür verweise ich auf die Abbildung 2.9 auf der Seite 34.

Standards

Auf nationaler sowie internationaler Ebene werden Anstrengungen unternommen, einheitliche Normen zu entwickeln. Dadurch könnten weitere länderspezifische Anpassungen vermieden werden und zugleich eine Gleichstellung zwischen konkurrierenden Planungsbüros auf dem globalen Markt erreicht werden (BSI-Group 2019)

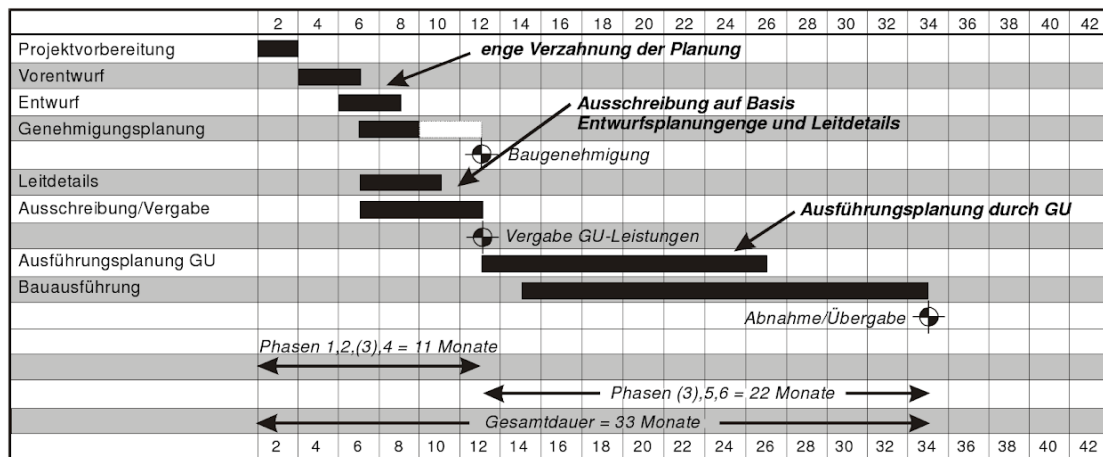


Abbildung 2.9: Grobablauf bei der Standard-Vertragsstruktur Generalplaner - Generalunternehmer (mit Leistungsphase 5 HOAI)

Quelle: Aus (Mittelstädt 2006, S.158) übernommen

Das Risiko, in einem Unternehmen interne Richtlinien zu entwickeln, die dann inhaltlich weit von den global abgestimmten liegen werden, ist somit zurzeit relativ groß. Darüber hinaus bedarf solche Arbeit zeitliche, finanzielle und menschliche Ressourcen. Deswegen werden Teilnahmemöglichkeiten in den normenentwickelnden Gremien oder bei den Entwurfsänderungen als empfehlenswert gesehen.

Bibliotheken

Einerseits wird die Aufgabe, die Bibliothekselemente zu erstellen, in Zukunft auf die Schulter der Produkthersteller verlagert. Andererseits befindet sich die Baubranche erst am Anfang der Digitalisierung. Anforderungen seitens Bauherren, Betreiber sowie IT-Bereich (IFC-Spezifikation gemeint) sind noch nicht definiert. Daraus lässt sich schließen, dass auch der Nutzen für Tragwerksplaner und andere Planer noch nicht in Sicht ist und dass die Produkthersteller selber die Standardentwicklung beeinflussen sollten, um später von selbst angebotenem Mehrwertniveau und selbst entwickelten Standards einen Vorrang auf dem Bauproduktmarkt zu erzielen (Glockner 2016)

„So ist zu erwarten, dass in den kommenden Jahren auch an Hersteller immer mehr Anforderungen bezüglich BIM gestellt werden. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass sich auch Hersteller mit dem Thema BIM befassen. Da sie in der glücklichen Lage sind, dass erst wenige konkrete Anforderungen an sie existieren, können Hersteller jetzt die Chance nutzen, sich auf diese Entwicklung vorzubereiten und sie gegebenenfalls sogar beeinflussen.“

Obwohl gut vorbereitete und regelmäßig gepflegte Modelldaten die verschiedenen weiteren Einsatzfelder profitieren lassen (4D-, 5D-Planung und andere), wird der Aufwand für frühere Planungsphasen proportional größer und somit der Verwaltungsbedarf und der Bedarf an Kontrollfunktionalitäten gleichermaßen größer. Diese Tatsache kommt bei der Handhabung großer Datenmengen immer vor und muss grundsätzlich als ein wichtiger Faktor der **Komplexitätserhöhung** berücksichtigt werden.

Die Konsistenz aller Daten aus der Bibliothek ist eine reine Softwarepflicht. Das heißt ein geändertes Objekt im Modell muss in der Bibliothek entweder eine Selbstkopie erstellen oder das ursprüngliche Objekt automatisch ändern. Aber das ganze wiederholt sich dann umgekehrt. Ein geändertes Objekt aus der Bibliothek führt zu den sofortigen Änderungen bei seinen Instanzen überall im Modell (auch dort, wo der Planer momentan visuell keine Änderungen sehen und merken kann).

Anforderungsmanagement

Es besteht die Gefahr der Dateninkonsistenz infolge manueller Handhabung von digitalen Tabellen (z.B. Excel). Dieses Risiko kann nur durch Verwaltungssysteme mit Kontroll- und Filterungsfunktionen gelöst werden. Als Beispiel eines solchen Systems kann ein Datenbanksystem für das Anforderungsmanagement bei BIM-Projekten BIMQ[®] vorgeschlagen werden:

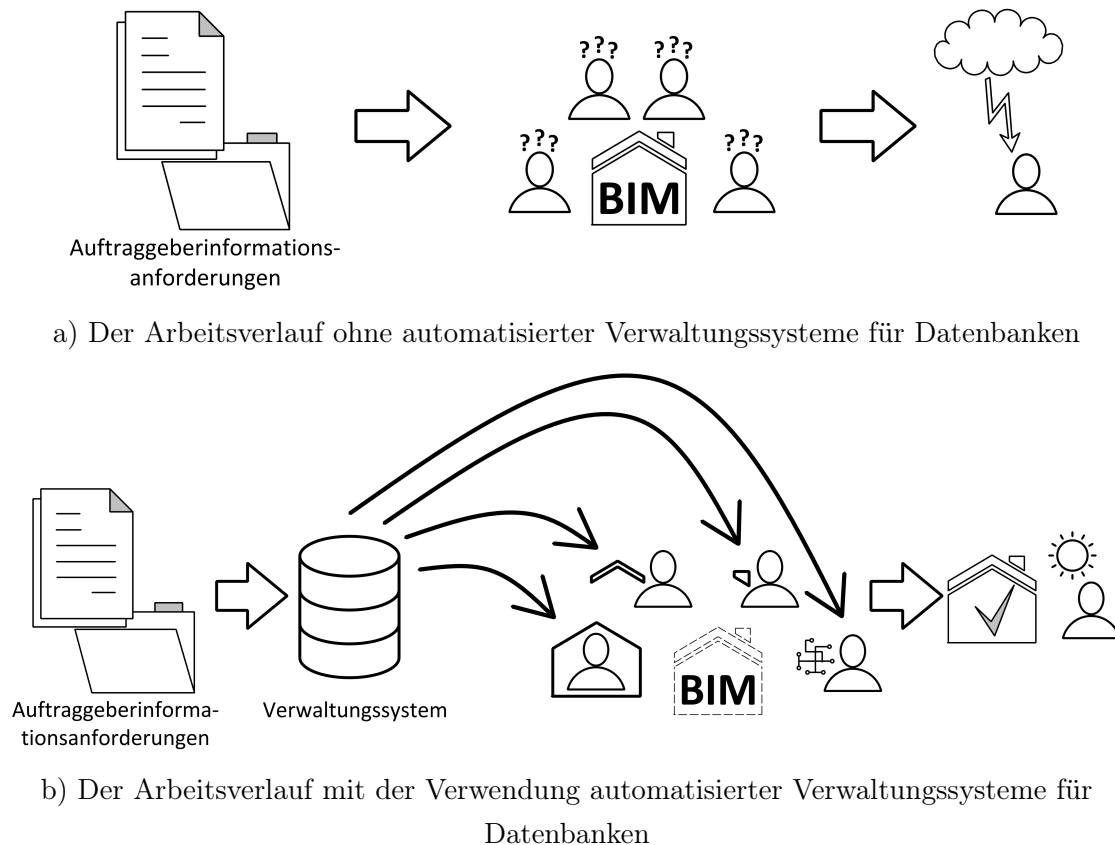


Abbildung 2.10: Auftraggeberinformationsanforderungen aus einer digitalen Datenbank

Auftraggeberinformationsanforderungen können sowohl in Form von Tabellen z.B. Excel erstellt werden, als auch in Form von Online-Datenbanken, wo man spezielle Werkzeuge zur Datenmanagement implementiert. Grundgedanke ist dabei: der einzelne Fachplaner bekommt sehr schnell aus der Anhäufung von Tabellen oder aus einem Graph der gesamten Anforderungen seinen individuellen Teil (Abbildung 2.10b). Dieser Teil enthält nur für diesen Planer relevante Informationen, die er später bei der BIM-Modellierung oder beim Visualscripting benutzen muss.

3 BIM im Membranbau

Dieser Abschnitt stellt die aktuelle Situation im Umgang mit Membranstrukturen innerhalb der BIM-Methode dar. Der Membranbau ist eines der anspruchsvollsten Bereiche der Tragwerksplanung. Dafür sprechen folgende Argumente:

- Hochgradig nichtlineares Tragverhalten (Wagner 2016, SS.319)
- Anzahl von veränderlichen Parametern (Grunwald, Ihde 2017, SS.300-301)
- Anzahl von Schnittstellen zwischen Beteiligten (Ihde 2018, SS.12-13,157-158), (Seidel 2008, S.4)
- Geometrie jedes Tragwerks ist oftmals ein Unikat (Seidel 2008, S.204)

Dies legt die Schlussfolgerung nahe, dass die Tragwerke aus diesem sehr speziellen Gebiet des Bauingenieurwesens nur von einer begrenzten Anzahl von entsprechend spezialisierten Planungsunternehmen entworfen und berechnet werden können. Folglich werden oft die internationalen Wettbewerbsausschreibungen organisiert, um die bestmöglichen Planungsteams zu bilden. So können sich an einem Projekt Ingenieure aus aller Welt beteiligen, was bei Projekten aus anderen Bereichen selten der Fall ist.

Außerdem ist die Berücksichtigung sowohl internationaler als auch nationaler Normung erforderlich, um das hohe Qualitätsniveau von anspruchsvollen Projekten sicherzustellen. Auch was den Bereich BIM betrifft, stellen solche Normungsinteraktionen in manchen Fällen eine Herausforderung dar. Für einen Überblick über die internationalen BIM-Normen wird hierfür auf den Abschnitt 1.1.3 und Tabelle 1.1 auf der Seite 7 verwiesen. Terminologische Diskrepanz bei der Verwendung unterschiedlicher Normen wird in der Abbildung 2.5 auf der Seite 22 anschaulich dargestellt.

Im großen Ganzen unterliegt der Membranbau jedoch den folgenden allgemein anerkannten BIM-Prinzipien:

- parametrisch oder assoziativ aneinander gebundene Bauteile, die mehrere vordefinierte Detaillierungsgrade aufweisen können;
- Referenzebenen und Bezugskoordinatensysteme als Hauptreferenzen für die Mehrheit der Bauteile;
- semantische Daten werden beidseitig beeinflusst (grafische Änderungen im Modell ändern automatisch auch Datenbankwerte, Änderungen in der Datenbank beeinflussen die Bauteilgeometrie im Modell)

Basierend auf diesem Überblick über die besonderen Eigenschaften und Zielkriterien für BIM im Membranbau wird im folgenden Abschnitt eine eingehende Analyse von Merk-

malunterschieden zwischen den spezifischen BIM-Zielsetzungen für Massivbau/Hochbau und Membranbau durchgeführt. Danach werden aktuelle Vorschläge von anderen Autoren vorgestellt und grafisch verdeutlicht. Anschließend werden die Eigenschaften der klassischen Arbeitsmethode und der BIM-basierten Projektorganisation im Bezug auf Membranbau gegenübergestellt.

3.1 Vergleich zwischen Membranbau und anderen Baubereichen

Der Vergleich zwischen BIM im Massivbau/Hochbau und BIM im Membranbau liefert folgende Erkenntnisse:

- Der Membranbau ist nicht so stark genormt, wie Hochbau, Zivilbau oder industrieller Bau. Die in der Praxis benutzten Regelungen unterstehen ständigen Änderungen. Dementsprechend lassen sich nicht so leicht Bauteildatenbanken implementieren. Viel mehr ist individuelle Anpassung und Neuentwicklung erforderlich.
- Die Planung der Membranbauprojekte unterscheidet sich durch die Formfindung, Zuschnittsermittlung, Montageplanung und starke Individualität des Entwurfs (folglich auch der Enddetails)
- Während im Zivilbau parametrisch-assoziative Planung keine entscheidende Rolle spielt (und deswegen nicht so verbreitet ist), ist sie aus den in (Steinegger 2015, S.61) und (Grunwald, Ihde 2017, S.295) genannten Gründen in Membranbauprojekten viel wichtiger.
- Während im Zivilbau Mangel an Rechnerkapazitäten wegen großen Bauvolumens entstehen kann, können im Membranbau noch komplexere parametrische Abhängigkeiten dazukommen. Bei Bedarf einer iterativen Optimierung der Tragwerkstopologie erhöht sich die Belastung auf Arbeitsspeicher und Zentralprozessor (CPU).
- Im Zivilbau wird für die Übergabe an den Bauherr meistens der Endzustand des Gebäudes gefordert, beim Membranbau entsteht noch der Bedarf am Montagezustand. Die beiden Zustände müssen auf eine bestimmte Weise im BIM-Modell enthalten sein (Grunwald, Ihde 2017, SS.297-298).
- Im Zivilbau können sich seriell wiederholende Lösungen vorkommen (Detailsbibliotheken finden breite Anwendung), Membranbauprojekte sind meistens Unikate (Seidel 2008, S.204). Darüber hinaus können individuelle konstruktive Lösungen für die Detailausbildung notwendig sein.

- Spricht man von offenen Austauschformaten, wird ihre starke Orientierung am Massivbau sofort ersichtlich. So behandeln IFC-Klassen strukturiert und systematisch fast alle Standard-Bauteile und Attribute aus dem Massivbau. Für den Membranbau wurden bis jetzt keine spezialisierten Bauteil-Klassen eingeführt. Es gibt Schwierigkeiten bei der einheitlichen Definition freier Formen (Grunwald, Ihde 2017, SS.295).
- Während Massivbauprojekte in den professionellen BIM-Softwarepaketen in einem geschlossenen Kreis verarbeitet werden können, das heißt, dass alle Planungsbereiche (außer Statik) im gleichen Programm mit den ihren Aufgaben entsprechenden Modulen und Werkzeugen ausgerüstet sind, bleibt Membranbauplanung oft über mehrere Programme verteilt. Dementsprechend entsteht Bedarf an gut funktionierenden Schnittstellen, die verlustfreien Datentransfer ermöglichen.
- Der Bedarf an klassifizierten und nach StLB kategorisierten BIM-Objekten wird allmählich im Massivbau befriedigt. Membranstrukturbildende Bauteile bleiben bisher bei dem Prozess außer Acht (ebd., S.296).
- Während sich Expertenwissen über die Zusammenhänge zwischen architektonischen und analytischen Modellen (sowie allgemein üblichen Bauregeln) im Massivbau gut formalisieren lässt, haben Membranbauprojekte stark individualisierte Abhängigkeiten zwischen tragwerksbildenden Teilen oder Referenzobjekten anderer Planer. Diese Einzellösungen werden extra für das jeweilige Projekt parametrisiert und können nur begrenzt in ein anderes Projekt übernommen werden.
- Die Anzahl der Beteiligten, ihre Anforderungen und Interessen kann im Hochbau relativ größer sein als im Membranbau (aus TGA-Bereich, Bauphysik u.s.w.). Membranbau verbindet zwar weniger weit voneinander entfernte Planungsfelder, kann aber bei internationalen Projekten zu den geografisch bedingten Problemen führen. Die Beteiligten aus unterschiedlichen Ländern haben oft verschiedene Normung und etablierte Methoden in der Baupraxis. Auch politisch bedingte Auflagen über Verarbeitung digitaler Daten können hier zusätzliche Schwierigkeiten bereiten.

Zusammengestellte Unterschiede bei Massivbau und Membranbau in tabellarischer Form:

BIM im Massivbau	BIM im Membranbau
stark genormt	flexibel, herstellerabhängig
Tragwerk bedarf statischer und ggf. dynamischer Analyse, anschließend Detaillierung	zu den links genannten kommen Formfindung, Zuschnitte, Werkstattplanung und Montageplanung
kleine Anzahl an Varianten \Rightarrow parametrisch-assoziative Vorgehensweise lohnt sich nicht	parametrisch-assoziative Vorgehensweise zwingend erforderlich
Rechnerkapazitäten durch großes Bauvolumen ausgelastet	Rechnerkapazitäten durch Parametrik (Anzahl veränderlicher Parameter) und ggf. Optimierung ausgelastet
Endzustand im 3D-Modell	Endzustand und Montagezustand im 3D-Modell
wiederholende Lösungen bei Enddetaillierung	individuelle konstruktive Lösungen
IFC-Format-angepasst	schwache Unterstützung durch IFC-Format
Alle Planungsbeteiligten (außer Statiker) in einer BIM-Umgebung	BIM-Datenfluss durch verschiedene Programme
nach StLB klassifizierte BIM-Objekte vorhanden	keine nach StLB klassifizierten BIM-Objekte
formalisierbares Expertenwissen	Einzellösungen; Erfahrung des Fachplaners bleibt unformalisierbar
Interdisziplinarität durch verschiedene Gewerke	Interdisziplinarität durch starke Internationalisierung

Tabelle 3.1: Gegenüberstellung BIM-Arbeitsmethode im Massivbau und Membranbau

Datenfluss/Prozesslandkarte im Membranbau

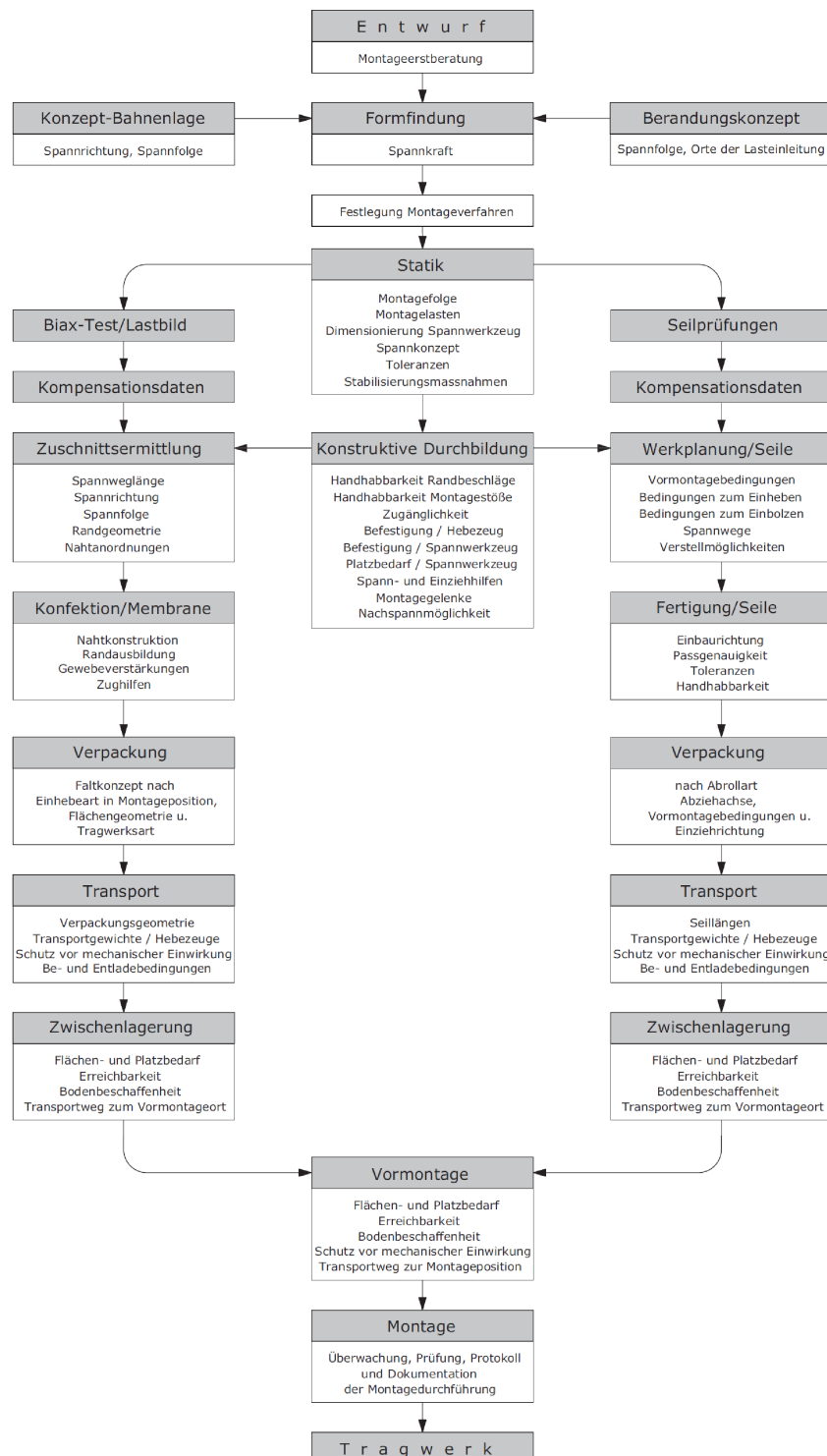


Abbildung 3.1: Formfindung, Statik, Montageplanung (Planungsprozess biegeweicher Tragelemente)

Quelle: (Seidel 2008, S.100)

3.1.1 Forschungsstand

Leichte Flächentragwerke sind vor allem durch ihre Form charakterisiert. Sie zeichnen sich durch Komplexität und Anpassungsunmöglichkeit an Normen und Bauteilkataloge aus. Diese Tatsache spiegelt sich auch in der Komplexität der Repräsentation solcher Formen in endgültiger BIM-Umgebung wieder. Die Form eines Membranbaus wird meistens mit räumlich gekrümmten Flächen und Kurven abgebildet. Ihre mathematische Beschreibung ist zwar seit langem bekannt, bereitet aber immer noch Probleme bei der Implementierung in offene Austauschformate wie IFC (Grunwald, Ihde 2017, SS.295-296). Ein ähnliches Problem betrifft mit Geometrien eng verknüpfte alphanumerische Daten. Diese werden abhängig von der gewählten BIM-Software unterschiedlich gespeichert und erfordern individuelles Vorgehen (ebd.).

Zum Zeitpunkt dieser Masterarbeit wurden bei keinem BIM-Softwarepaket vorgefertigte BIM-Bauteile für Membranstrukturen implementiert. Es gibt auch Bedarf an klassifizierten und nach StLB kategorisierten membranstrukturbildenden BIM-Objekten (ebd.). Gemäß in (Grunwald, Ihde 2017, S.297) vorgeschlagenem Konzept kann die Palette der in die BIM-Benutzeroberfläche zu integrierenden „intelligenten Bauteile“ für Membranstrukturen folgend gegliedert werden, wie es in der Abbildung 3.2 dargestellt ist.

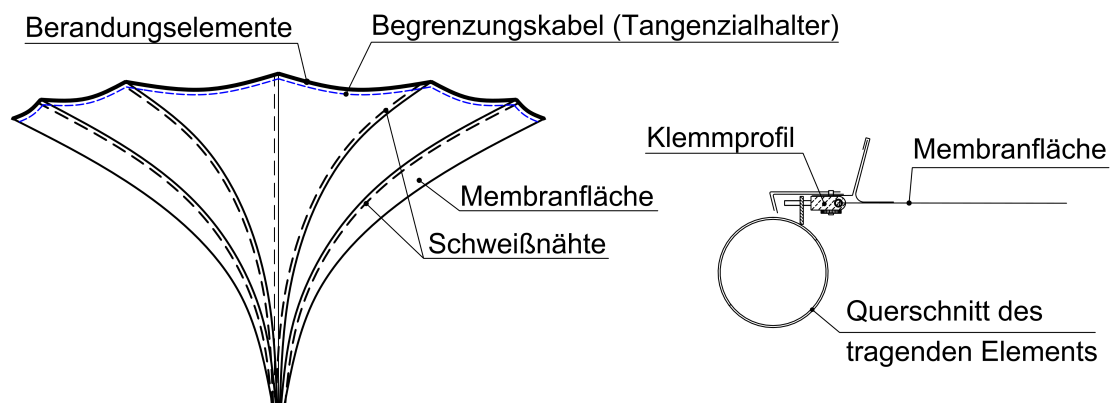


Abbildung 3.2: Mögliche Bauteilstrukturierung in einer BIM-Umgebung

Quelle: in Anlehnung an (Grunwald, Ihde 2017, S.297)

Die auf der Abbildung 3.2 dargestellte Aufteilung wird für die Überführung in eine softwarekompatible Klassifikation übergeordnet nach der Abbildung 3.3 auf der Seite 43 repräsentiert.

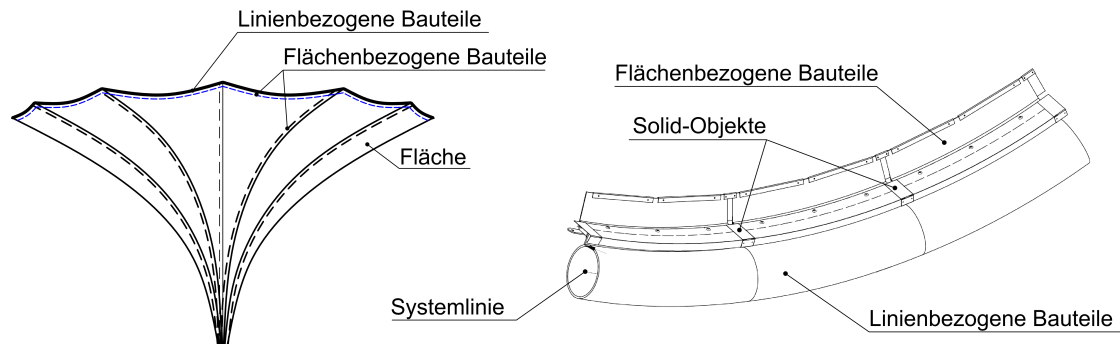


Abbildung 3.3: Referenzierung der Bauteilstrukturierung nach den formgebenden Elementen

Das in (Grunwald, Ihde 2017, SS.295-296) vorgeschlagene Datenkonzept für Membranstrukturen berücksichtigt folgende Aspekte:

- Detaillierungsgrad (LOD 100 - LOD 400)
- Montagezustand und Endzustand einer Membranstruktur
- Parametrische Zusammenhänge zwischen Linien-, Flächenelementen und "Solid"-Elementen (Knotenabhängigen Starrkörperelementen)
- Exakte (Geometrie)Repräsentation statt in Linien diskretisierte (Polygonnetze)
- Umgang mit alphanumerischen Daten (siehe unten)

Dieses Datenkonzept für Membranstrukturen berücksichtigt unstrukturierte (von Produktherstellern abgängige) und strukturierte Daten. Strukturierte Daten setzen eine klar vordefinierte Struktur von Attributfeldern voraus, die von Nutzern, von (Excel-Datenbank) tabellenbasierten Managementsystemen oder von parametrischen Skripten innerhalb BIM-Umgebung gefüllt werden. Möglicher Vorschlag für die zu generierenden Attributenlisten enthält (ebd., SS.299-300)

Die in der Abbildung 3.2 dargestellten Bauteile können nun auf die im 3D-Raum platzierten Bezugsobjekte referenziert werden. Zu den einfachsten Typen der Bezugselemente gehören Punkt, Linie und Fläche. Somit reduziert sich die Bauteilstrukturierung auf diese drei Basiselemente. Die grafische Repräsentation kann der Abbildung 3.3 entnommen werden.

3.1.2 Anpassung klassischer Projektorganisation an BIM-Arbeitsmethode

Konventionelle Arbeitsmethode	Beschreibung des vorgeschlagenen Ansatzes mit BIM-Technologie ¹
AutoCAD-basiert (⇒ unzureichende Funktionalität und Softwarekapazitäten)	Fokus auf Universalität verwendeter Software (⇒ stark erweiterte Palette an Möglichkeiten ²)
meistens keine parametrischen Abhängigkeiten zwischen Elementen und nicht assoziativ	Werkzeuge zum Aufbau parametrisch gesteuerter Bauteile und Tragwerksstrukturen
Ausgabe in gedruckter Form ⇒ keine Daten werden digital weitergegeben ³	Gewährleistung der Mitlieferung von bestimmten Daten an vordefinierte Beteiligte ⁴
papierbasierte Koordination zwischen Gewerken	Koordination durch eine "Cloud"-Umgebung (eventuell in "Realtime"-Modus)
Manuelle Archivierung und Benachrichtigung über Änderungen (Gefahr Dateninkonsistenz)	Autoversionierung aller auf den Server hochgeladenen Daten
Aktualisierung der herstellerspezifischen Informationen wird manuell durchgeführt	Direkter Bezug auf das jeweilige Produkt in der externen Datenbank

¹ Wunschkriterien, ohne Anspruch auf die maximale Optimalität unter allen möglichen Alternativen.

² Durch Zugang zu "Application Programming Interface" (API).

³ Jeder Beteiligte generiert seine eigenen geometrischen und semantischen Daten, infolge Datenverlust (Abbildung 3.4).

⁴ Durch die Verwendung verschiedener Ausgabeformate und strukturierter Datenbanken.

Tabelle 3.2: Gegenüberstellung klassischer und BIM-Arbeitsmethode (im Bezug auf Membranbau)

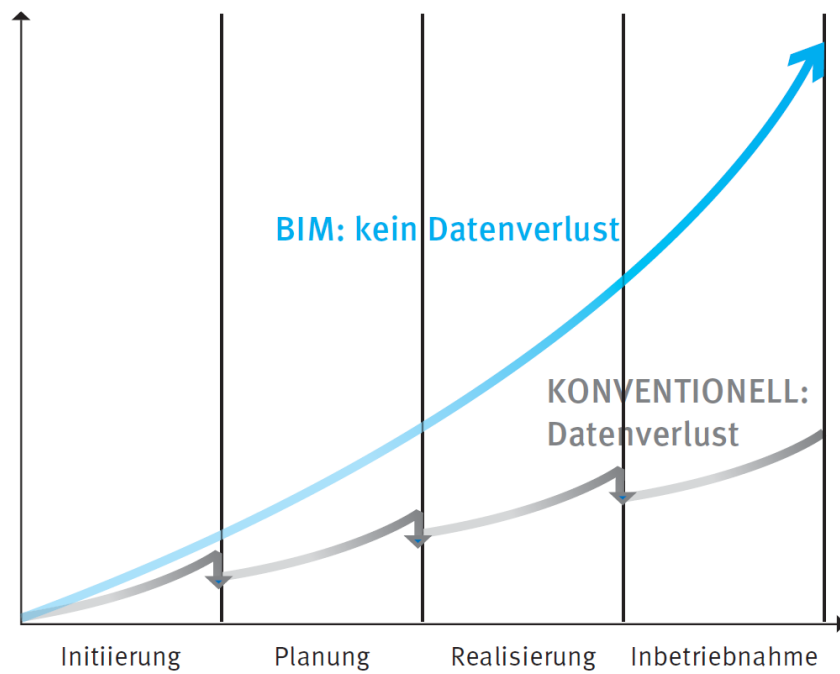


Abbildung 3.4: Datenverlust bei konventioneller Arbeitsmethode
Quelle: (Sommer 2016, S.134)

3.2 Detaillierte Behandlung einzelner Problemstellungen

Klassen der Problemstellungen

Die Herausforderungen während der BIM-Einführung im Membranbau unterteilen sich in technische (oder IT-bezogene), soziale (bezogen auf menschlichen Umgang mit neuen Methoden) und rechtliche (juristische Seite /intellektuelles Eigentum).

Zu den sozialen Herausforderungen zählen unter anderem Schulungen der Anwender sowohl bei ihrer eigenständigen Nutzung eines Programms als auch bei Zusammenarbeit im Projekt, Koordinationsregeln und Ähnlichem. Mit der Zunahme des Automatisierungsgrades verlieren soziale Aspekte an Bedeutung, während technische wichtiger werden.

Soziale Aspekte bedeuten auch den Umgang mit dem Expertenwissen, das (noch) nicht mit formalen Algorithmen beschrieben werden kann. Zum Beispiel die Kontrolle der Plausibilität von Softwaregelieferten Daten. Ein erfolgreicher Importprozess bedeutet nicht immer korrekte Ergebnisse, sondern muss zumindest grob von einem erfahrenen Experten mit kritischem Zugang überprüft werden.

Auch rechtliche Fragen wurden bei anderen Autoren aufgedeckt, zum Beispiel das Problem mit dem Schutz des intellektuellen Eigentums bei hohen Detaillierungsgraden oder die Verantwortungszuweisung bei den von mehreren Planern beeinflussten Tragwerkstrukturen (Grunwald, Ihde 2017, S.301). Rechtliche Herausforderungen haben zwar allgemein für alle BIM-Projekte hohe Relevanz, können aber im Membranbau wegen des Unikatcharakters des Entwurfs verschärft zu Tage kommen.

Obwohl technische, soziale und rechtliche Klassen der Fragestellungen sehr eng miteinander verknüpft sind, würde ihre allumfassende Untersuchung den Rahmen dieser Masterarbeit sprengen. Deswegen wird in den weiteren Unterabschnitten ausführlicher auf die einzelnen Fragestellungen aus Sicht ihrer technischen Lösbarkeit eingegangen.

3.2.1 Technische Problemstellungen

Darstellung von Membranbaustrukturen in einer CAD/BIM-Umgebung

Wie es in (Grunwald, Ihde 2017, SS.295-296) beschrieben wird, charakterisiert sich der Aufbauprozess des Modells durch „aufwendige, zeitintensive“ Schritte. Ausgehend von den komplexen Formen, die bei Flächentragwerken aus der Bedingung der Formaktivierung hervorgehen, wird ihre mathematische Beschreibung fast ausschließlich durch nichtlineare Funktionen höherer Grade geführt (Bletzinger 1990) und (Kemmler 2014, S.11)

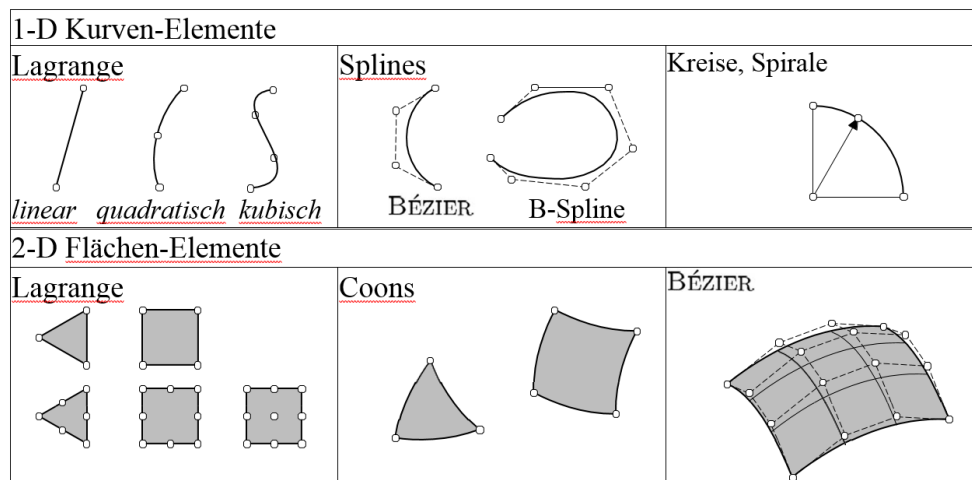


Abbildung 3.5: Beschreibung der gekrümmten Elemente im CAD mit NURBS und Bezier-Splines

Quelle: (Aus Dissertation (Bletzinger 1990) und Skript von Prof.R.Kemmler (Kemmler 2014, S.11))

Diese Tatsache erfordert einen entsprechend sensibilisierten Zugang zu dem Geometrieaustauschprozess (Ihde 2018, SS.158)

„Bei der Übergabe mittels Plänen entstehen Mess- und Interpretationsfehler. Werden Geometrien über räumliche Modelle übergeben, entstehen aufgrund von Umwandlungen zwischen verschiedenen Programmpaketen kleinere Abweichungen und Ungenauigkeiten. Sowohl bei der Planübergabe aber auch bei der Übergabe mittels räumlicher Geometrien ist das genaue Vorgehen bei der Erzeugung der Geometrie nicht mehr nachvollziehbar.“

Folglich wird die Eingabe der zu erstellenden Geometrie durch die parametrisch-assoziative Vorgehensweise als wünschenswert betrachtet. Diese garantiert die Exaktheit der Entwurfsform nach ihrer Übergabe in ein anderes Softwarepaket nicht mehr mit den einzelnen proprietären Instanzen des Austauschformates, sondern ausschließlich durch die scriptbasierte, der mathematischen Beschreibung annähernd gleiche Formulierung. Damit lässt sich der höchste Grad an Austauschqualität bei Flächentragwerken erreichen.

Das offene Austauschformat IFC ist nach Angaben aus früheren Publikationen für den Einsatz bei komplexförmigen Strukturen ungeeignet (Grunwald, Ihde 2017, S.295). Es wird jedoch weiterentwickelt und mit fehlenden Optionen angereichert. In Zukunft wird dieses Format bei öffentlichen Bauvorhaben offensichtlich bevorzugt, da es ein neutrales¹, normenbasiertes (ISO 16739) Format ist (ebd.).

Expertenwissen

Bei jedem modernen Vorhaben liegt eine lange Geschichte der Ansammlung von Erfahrungen oder Expertenwissen dahinter. Besonders im Membranbau haben

- Erfahrung des Planungsteams eines Einzelunternehmens (A) und
- Beziehungen zu den produktherstellenden Firmen (B)

einen großen Einfluss auf die Gestaltung des BIM-Modells/-Konzepts. Expertenwissen ist stark individualisiert, kann meistens nicht allgemein formalisiert sein, sondern bleibt immer an den entwerfenden Fachplaner angebunden.

Diese Erkenntnisse lassen sich aus der gegenwärtigen Ingenieurpraxis bestätigen und geben einen Impuls zu der weiteren Erforschung in der Zukunft (Ihde 2018, SS.17, 153-154).

„Erfolgreiche Lösungsvarianten/-strategien für gleichartig komplexe Aufgabenstellungen auf Basis von Expertenwissen können nicht oder nur stark beschränkt gespeichert und in einem neuen Projekt wiederverwendet werden.“

Bibliotheken und Datenbanken

Ähnlich, wie beim Thema „Expertenwissen“ entsteht hier der Bedarf an der aufwendigen manuellen Datenpflege. Es gibt im großen Ganzen zwei mögliche Ansätze zur Lösung dieser Probleme:

- Hersteller stellen ihre Produkte für jegliche Planungsbüros/-Projekte mit allen vertraglich erforderlichen Attributen oder Parametern bereit.
- Die Mitarbeiter des Planungsunternehmens erstellen alle im jeweiligen Projekt notwendigen Bauteilinstanzen selber. Obwohl diese Lösung als eine zeitintensivere eingeschätzt wird, bleiben aber die auf solche Weise angesammelten Bibliotheken beim Unternehmen intern und können gegebenenfalls geschützt in den Projekten verwendet werden. Hier lassen sich entsprechende Wettbewerbsvorteile erkennen, die dem großen Aufwand gerecht sind.

¹Dies bedeutet, dass IFC ein nicht proprietäres Format ist, das mit einer frei zugänglichen Spezifikation veröffentlicht wurde

Die Mitarbeiter des jeweiligen Unternehmens können die Erstellung der Datenbank am besten durchführen, da sie sich mit ihren herkömmlichen Konstruktionslösungen gut auskennen.

Die Eingabe sowohl geometrischer als auch semantischer Daten ist zeitaufwendig. Als eine der möglichen Lösungen für die Zuweisungsautomatisierung bei den alphanumerischen Informationen wäre der Einsatz Excel-basierter Managementsysteme, von denen alle Bauteile im BIM-Programm gepflegt werden könnten (Grunwald, Ihde 2017, SS.296).

Geistiges Eigentum und rechtliche Fragen

Technische Ebene

Der Schutz des geistigen Eigentums wird softwareabhängig konzipiert. Einige Programme wie Dynamo[®] für visuelle Programmierung sind vom Anfang an als eine Open-Source-Plattform² aufgebaut und setzen kein Skripten-Schutzsystem voraus. Im Unterschied zum Dynamo kann man in Grasshopper „by default“ passwortgeschützte Cluster mit den visuellen Scripten erstellen.

Für die Einhaltung von EU-Gesetzen zum Datenschutz sollte sich gegebenenfalls auch der BIM-Server territorial im Binnenland befinden. Diese Vorschrift kann durch die selbstbetriebenen Server oder Cloud's-Angebote von den einheimischen BIM-Softwareherstellern befriedigt werden, wie zum Beispiel BIMPlus[®] von Nemetscheck, wenngleich es höhere Ausgaben für die ausreichend schnelle Infrastruktur erfordert.

Als eine sehr innovative und zukunftsweisende Technologie kann man noch die Blockchain-Technologie erwähnen. Durch diese Technologie wird jede Modellversion in eine Kette eingebaut, die dezentral gespeichert wird. Darauf wird in dieser Masterarbeit nicht eingegangen, aber im Weiteren empfiehlt sich die Verfolgung der Entwicklung dieser Technologie.

Juristische Ebene

Die Fragen nach Urheberrechten bleiben im Allgemeinen noch nicht ausreichend gelöst. Jeder weitere Beteiligte, der das Tragwerksmodell nutzt, bis hin zum Betreiber, könnte mit den 3D-Daten hypothetisch alles tun, was es wollte. In dem Zusammenhang entsteht die Frage, ob nur „gebackene“, das heißt die fixierte Geometrie, übergeben wird und nicht die Skripte, auf denen sie beruht. Zu einer klaren Abgrenzung bei solchen Fällen muss eine spezielle Vertragsform ausgearbeitet werden, die juristisch exakt diese Aspekte behandelt.

²<https://primer.dynamobim.org/de/>

Zur Gestaltung einer korrekten vertraglichen Vereinbarung mit deren klar vordefinierten Anforderungen, Verantwortlichkeiten und Haftung für Nichterfüllung von den vorgeschriebenen Auflagen trägt nicht nur die juristische Kompetenz bei, sondern auch die abweichenden BIM-Ansätze und Regeln in den verschiedenen Staaten und Regionen der Welt. Die Berücksichtigung von besonderen länderspezifischen Vertragsbedingungen bei internationalen Projekten kann als ein weiterer Baustein auf dem Weg zur BIM-Etablierung erachtet werden.

Organisation der Verantwortlichkeiten für Modellstrukturen

Verantwortungsbereiche

Im Weiteren kann der großvolumige Planungsumfang bei einem Projekt über mehrere Planungsbüros verteilt werden. Solche Fälle können nicht nur bei Interaktionen zwischen den Teilen eines neugeplanten Tragwerks vorkommen, sondern auch bei der Anbindung des Tragwerks an ein bestehendes Gebäude (Vergleiche hierfür die Abbildung 3.6 auf der Seite 50)

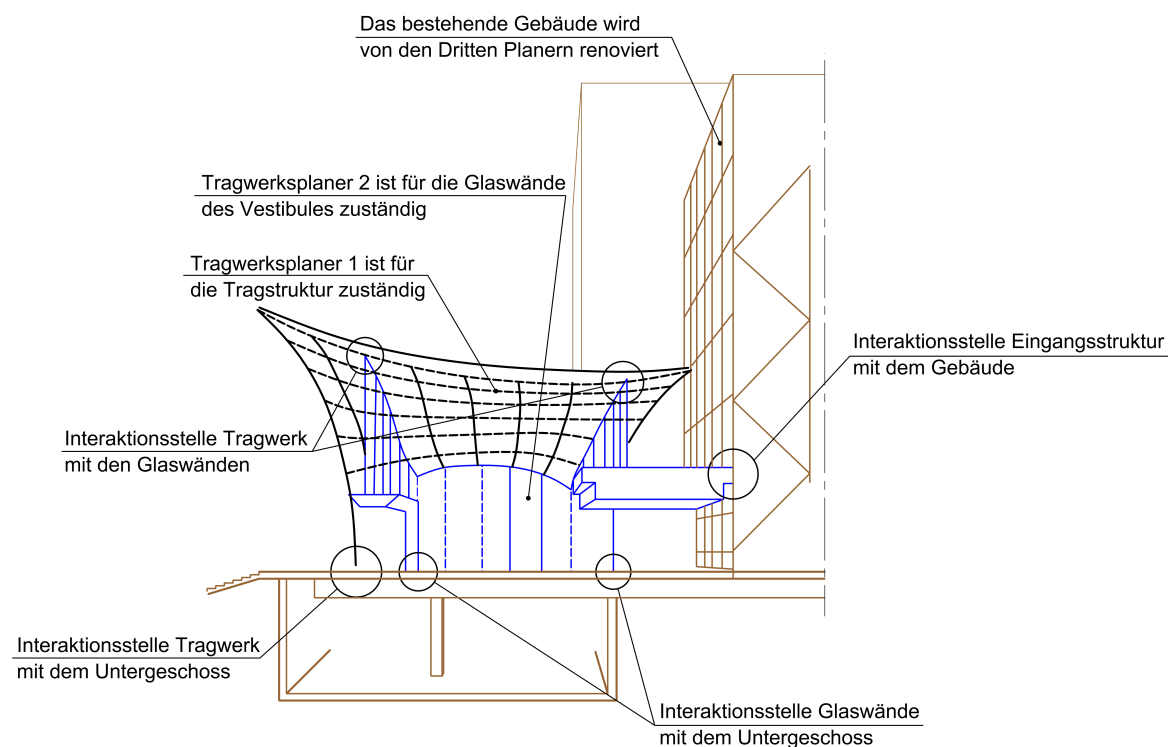


Abbildung 3.6: Fallbeispiel für die Aufteilung der Verantwortungsbereiche bei der Interaktion einer neuentwickelten Überdachungsstruktur mit dem bestehenden Gebäude

Logischerweise müssen die Verantwortungsbereiche sowohl technisch (je nach Prinzip

des Datenmanagements im jeweiligen Softwarepaket) als auch juristisch abgegrenzt sein. Beim letzteren kann dies durch die Festlegung entsprechender Rollen und deren Rechtezuweisung im Abwicklungsplan oder Prozessdiagramm erfolgen.

Auf der technischen Ebene hängt die mögliche Lösungsstrategie von der Funktionsart und der Algorithmik des Softwarekerns ab. So wird zum Beispiel bei Revit® der Schwerpunkt bei der Datensystematisierung auf die Referenzierung einzelner RVT-Dateien gelegt, so dass die Zugriffsrechtezuweisung für die Änderungen jeweiliger Dateien an die Werkzeuge des Betriebssystems angebunden ist.

Alternativ dazu verfolgt die BIM-Software Allplan® ein sogenanntes Lock/Unlock-Prinzip für Lese- bzw. Schreibzugriff zu den vorher bereitgestellten NDW-Dateien, die gleichzeitig einem Projekt zugeordnet sind. Die Rechtezuweisung jedes einzelnen Projektbeteiligten wird mittels interner Zuordnungsfunktion in Allplan® vom BIM-Projektmanager durchgeführt.

Die Organisation der Verantwortungsverteilung hat auch Bezug zu dem Anforderungsmanagement. Dieser stellt eher die Organisationsebene der ganzen Planung dar und wurde in dieser Masterarbeit im Abschnitt 2.3 auf der Seite 36 beschrieben.

Kommt es im Projektverlauf zur disziplinübergreifenden Bauteil-/Detailsanfertigung, werden Zugangsrechte beim BIM-Projektmanager beibehalten, während alle betreffenden Beteiligten mit einer Kopie der bauteilenthaltenden Datei arbeiten. Für die abschließende Zusammenführung der Daten werden entsprechende Koordinationstreffen organisiert

Auch wird die Frage nach verantwortlichen Personen für die Anreicherung zusätzlicher Attribute für die Übergabe nach Simulationssoftware aufgeworfen. Im Zusammenhang mit den erläuterten BIM-Zielen stellt sie sowohl die rechtliche als auch die technische Ebene der Organisation von BIM-Prozessen dar (Grunwald, Ihde 2017, S.300).

„If the BIM model is used for analyses, like thermal-, shading or structural verifications additional properties must be added to elements of the BIM model (i.e. properties describing the long-term behavior of the structure must be integrated to compensate time-related effects).“

Weiterer Klärungsbedarf

Weiterhin wird noch eine grobe Liste von Problemen definiert, die noch nicht so detailliert behandelt wurden und bei denen Klärungsbedarf besteht:

- Alternative Formfindungswerkzeuge innerhalb von Programmen für visuelles Skripting (wie gut sind dort implementierte Algorithmen? Wie genau sind von diesen gelieferte Ergebnisse?);
- Bidirektionale Verknüpfungen konventioneller Formfindungsprogramme zur BIM-Umgebung (wie lassen sich Ergebnisse in Mesh-Form in die exakte Geometrie überführen?);
- Vereinfachung der Integration externer geometrischer Daten und ggf. ihre Transformation in „intelligente Bauteile“ (Familien in Revit®, Smartparts in Allplan® und weitere mögliche Alternativen);
- Organisation mehrerer Modellzustände oder mehrere BIM-Modelle. Zuschnitte gehören zu einer separaten Schleife (nur nach Formfindung und Optimierung des Tragwerks;⇒ als ein zusätzlicher Bestandteil im Endmodell nach der Werkstattplanung). Montagezustand als wichtiger Bestandteil im Modell. Dieses Problem steht in engem Bezug zur Rechteverteilung.
- Anforderungen an Rechnerkapazitäten und Geschwindigkeit der Internet-Verbindung bei der Bearbeitung von komplexen disziplinübergreifenden Membranbauprojekten
- Datenversionierung und Aktualisierung gehört wiederum sowohl zu den organisatorischen Problemen als auch zu den technischen. Technisch gesehen müssen ausreichende Kapazitäten und ein gut durchgedachtes SystemEngineering vorhanden sein.

3.2.2 Herausforderungen beim Übergang zum neuen Konzept

Wie es vorne im Abschnitt 2.2.1 auf der Seite 24 erwähnt wurde, bereitet die Übergangsphase eine Reihe von Sonderfragestellungen, die nach der Einrichtung eines ordnungsgemäßen Betriebs keine Relevanz mehr spielen werden:

- Expertenwissen muss oft rechtlich geschützt und bei jeglichem Planungsbüro angesammelt werden.
- Erforderliche Kompetenzen können nur mit einer längeren Ausbildung erworben und praxisbezogen verankert werden. Das Hybrid eines Bauingenieurs und Informatikers/Programmierers wird sich in der Zukunft zum Soll-Ausbildungsniveau durchsetzen.
- Hochleistungsfähige Computer sind bei komplexen Projekten und einem hohen geforderten Detaillierungsgrad zwingend erforderlich.

3.2.3 Weitere Implementierungsschritte

In den weiteren Abschnitten wird der Versuch unternommen, aus einer Vielzahl an Werkzeugen solche auszuwählen, die ein effizientes Konzept bilden können und dadurch die maximal mögliche Anzahl an vorher beschriebenen Problemstellungen vollständig oder teilweise lösen können. Zu den wichtigsten Teilbereichen, welche die übergeordneten Kriterien unserer weiteren Untersuchung ausmachen, gehören:

1) Anforderungen an Planungswerkzeuge bezüglich ihrer Kapazitäten des Datentransfers. Der Analyseprozess stellt die Frage in den Mittelpunkt „Wie kann ein weitestgehend automatisierter Workflow für den Datenaustausch zwischen vier Softwarepaketen organisiert werden?“. Dabei werden folgende Werkzeugtypen in Erwägung gezogen wie:

- Konzeptfindungssoftware wie Rhinoceros®
- FEA/Formfindungssoftware
- BIM-Software
- Werkstattplanungssoftware

2) Anforderungen an Planungswerkzeuge bezüglich Erweiterungsmöglichkeiten (API, COM-Schnittstellen, Visualskripting, Open-source-Projekte)

Hierfür wird zuerst die Verfügbarkeit der verwendeten Werkzeuge diskutiert:

- Dynamo ist ursprünglich Open-Source-Umgebung.
- Rhino3D® ist eine kostenpflichtige Umgebung, aber Grasshopper 3D® ist implementiert. Auch API-Zugang ist vorhanden. Die Dokumentation für Rhino3D® ist gut aufbereitet und bleibt weiterhin in ständiger Entwicklung
- Allplan® Visual Scripting ist auch nur mit vollständiger Version von Allplan® einsatzbereit.

Anforderungen an Planungswerkzeuge bezüglich finanzieller Ausgaben werden nicht untersucht, aber müssen natürlich Beachtung finden. Auch Einsteigerzeit muss mitberücksichtigt werden. Softwareschulungen können dabei ein bedeutsamer Anteil an der Ausgabesumme sein.

3.3 Workflow-Konzipierung

Aus den vorher behandelten Herausforderungen im Membranbau ergeben sich essentielle Anforderungen für die Anwendung eines BIM-Programms (oder einer abgestimmten Programmgruppe) für die Realisierung eines Membranbauprojekts (Grunwald, Ihde 2017, SS.295-300).

Zu den wichtigsten Anforderungen gehören:

- Interne bauteilorientierte und membranbaubezogene Werkzeuge.
- Unterstützung eines offenen Austauschformats.
- Übertragung aller räumlichen gekrümmten Geometrieformen.
- Eine geltende Datenbank mit den nach STLB-Beschreibung klassifizierten Bauteilen und herstellerepezifischen Produkten aus dem Membranbau.

In der erwähnten Quelle werden auch zwei zusätzliche allgemeine Empfehlungen für die Zukunft geäußert:

- Erweiterbare Kataloge mit Attributen anderer Projektbeteiligter (beispielsweise Wärme- und Schattierungsanalyse)
- Verlustfreie nahtlose Anbindung an Formfindungs- und Finite-Elemente-Analyse-Software (FEA) oder verifizierte Formfindungs- und FEA-Tools im BIM-Programm.
- Eingebaute oder externe Algorithmen zur automatischen Attributeingabe, z.B. Excelbasierte Managementsysteme.

Aus Nutzersicht spielt Benutzerfreundlichkeit und Ergonomie der Oberfläche eine entscheidende Rolle (Lin, Roithmayr 2015, S.8). Gleichmaßen bleibt der interaktive Dokumentierungsvorgang bis zum **BIM-Level 2**³ wichtig. Papiergedruckte Dokumentation gilt zurzeit als Endziel des Planungsprozesses und fester Bestandteil eines Archivs.

Eine Softwarelösung, die all diese Anforderungen bietet, existiert heute nicht. Von daher wird zurzeit von einem Verbund von Softwarepaketen gesprochen. Im Zentrum des Verbundes sollte das vom Bauherren geforderte Softwarepaket stehen. Ausgehend von dessen Vor- und Nachteilen, sowie der Komplexität der Nachrüstung und Anpassung zum bestimmten Projekt wird über anzubindende Programme und Erweiterungen entschieden.

Eine weitere wichtige Komponente ist die Berechnungssoftware für die statische und dy-

³Hierzu wird es auch auf den Abschnitt 2.1.2 und (Lin, Roithmayr 2015, S.3) verwiesen

namische Analyse des Tragverhaltens und optional auch für Formfindung. Für die Analysesoftware muss die Tragwerkstopologie in Elemente (Finite Elemente) diskretisiert werden sowie mit hinzugefügten Material- und Querschnittsangaben angereichert werden. Auf Grundlage der so erzeugten Elemente kann das Tragverhalten des Tragwerks analysiert sowie die lokalen Schnittgrößen der einzelnen Tragwerkselemente bestimmt werden. Basierend auf den so ermittelten Schnittgrößen können die Tragelementsdimensionen konkretisiert, optimiert und konstruktiv umgesetzt werden.

Das Entwurfsprogramm sollte idealerweise mit dem vom Bauherrn vertraglich geforderten Endprogramm übereinstimmen. Das heißt, die Quelle der Ausgangsgeometrie und Endgeometrie mit dazugehörigen semantischen Daten sollte ein und dasselbe Programm sein. Um einen Überblick über die Funktionalitäten der einzelnen aktuell verfügbaren Software sowie deren Intergration in einen Planungsverbund zu gewinnen, werden im folgendem Untersuchungen der Softwarelösungen durchgeführt und evaluiert.

Rolle einzelner Programme in der BIM-Kette

Wie frühere Abschlussarbeiten argumentativ gezeigt haben (Steinegger 2015) und aus der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Komplexität des Membranbaus empfiehlt sich für ein zukunftsorientiertes Büro, sich mit den parametrischen Arbeitsmethoden auseinanderzusetzen.

Dementsprechend sollte Entwurfssoftware mit den Werkzeugen visueller Programmierung oder mit eigenständigen Erweiterungen für skriptbasierte Erstellung intelligenter Bauteile ausgerüstet sein. Diese Behauptung findet ihre Bestätigung in dem aktuellen Entwicklungsstand sowohl bei etablierten BIM-Lösungen als auch bei den Programmen für allgemeine 3D-Modellierung wie Rhino3D®.

Idealerweise sollte die Entwurfssoftware und das BIM-Endprogramm ein und dasselbe Softwarepaket sein. Der Wunsch nach einer Reduktion der Entwurfsmittel im Planungsbüro auf ein Minimum wirft unter anderem die Frage nach der in den Mittelpunkt gestellten Softwarelösung auf. Rund um das zentrale Programm sollten dann Programme für die Berechnung und die Werkstattplanung reibungslos angebunden sein.

Da jedes moderne BIM-Programm heutzutage ein eigenes Modul für visuelle Programmierung hat, gab es zuerst Überlegungen, die gewünschte parametrisch-assoziative Planung gleich von Anfang an in einem BIM-Programm zu organisieren. Dabei wurde die Tatsache berücksichtigt, dass Anbindung an die Berechnung auch von dem Programm gestartet werden kann.

Dieses Konzept bedarf Kenntnisse der Module für visuelle Programmierung in der vom Bauherrn geforderten BIM-Umgebung. Die Benutzeroberflächen und Tastaturkurzbefehle können sich je nach Programm stark unterscheiden. Das Ziel wäre es ein möglichst

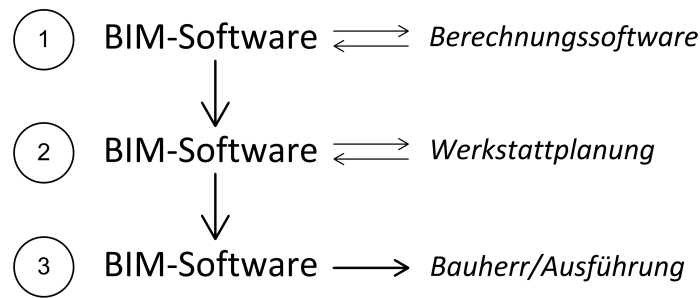


Abbildung 3.7: BIM-Programm mit Werkzeugen für die parametrische Planung als das Grundgerüst für den ganzen Workflow

universelles Konzept zu finden, bei dem man mit Kenntnissen visueller Programmierung und Weiterleitungsmöglichkeiten nach jeder beliebigen BIM-Software ausgerüstet würde.

In dem Zusammenhang wurde der Fokus auf eine der zukunftsweisendsten Softwarelösungen für parametrische Planung versetzt - Grasshopper 3D[®], ein Erweiterungsmodul für Rhino3D[®] (siehe auch kurze Beschreibung im Abschnitt 3.3.4).

Zu dessen Hauptvorteilen zählt unter anderem Urheberrechtsschutz (passwortgeschützte Skripte), große Verbreitung und Beliebtheit unter den Architekten (Entwurf Projekte mit freien Formen wie auch Membranbauprojekte) und Aussichten zur schrittweisen Umwandlung in ein Architektur- und Planungsprogramm mit der kompletten Dokumentationsanfertigung (unten wird detaillierter auf die einzelnen Bestandteile des gewünschten Automatisierungsworkflows eingegangen).

Unter Dokumentationsanfertigung kann Folgendes verstanden werden:

- Strukturiertes Managementsystem für die Verwaltung von Dokumentationspaketen (Anordnung zu Ordern, Korrekte Umnummerierung, assoziative Verweise zwischen Blättern, automatische Anpassung von Planköpfen (auch mit assoziativen Attributen), Schnellerzeugung vordefinierter Formatsets aus der Bibliothek)
- Breite Palette an vordefinierten Verbunden von Planelementen (Planrahmen plus Plankopf plus assoziative Beschriftungen, deren Werte mit einer zentralen Datenbank synchronisiert sind. Für unterschiedliche Bundesländer vielleicht verschiedene Standard-Bibliothekblätter.)
- Automatische Ableitung von 2D-Ansichten, Schnitten, Isometriebildern mit Autogenerierung der voreingestellten Beschriftungssymbole, -werte. Je nach Tragwerkstyp müssen unterschiedliche Muster der Elementenanordnung ausgearbeitet werden.
- Automatische Generierung der Stücklisten mit voreingestellten Ausgabeinformationen und ihre Zuordnung zu den dazugehörigen Plänen.

Somit wird die Mittelauswahl des Parametrisierungswerkzeugs nicht mehr in Frage gestellt und das allgemeine Grundkonzept aufbauend auf dem Grasshopper 3D[®] kann der Abbildung 3.8 entnommen werden.

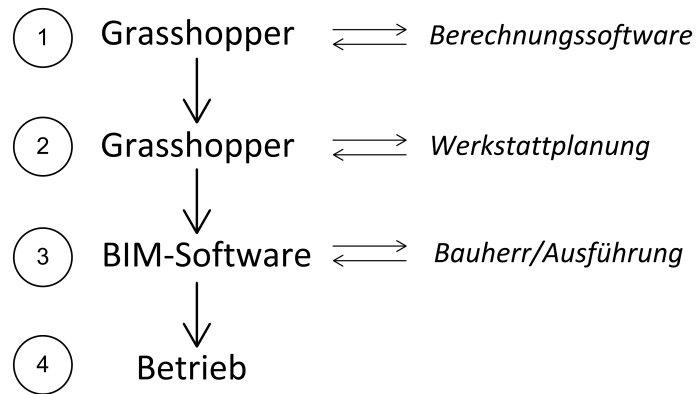


Abbildung 3.8: Grasshopper 3D[®] mit Rhino3D[®] bildet das Grundgerüst für das ganze Workflow

3.3.1 Varianten der Zusammenarbeit im Membranbauprojekt

Die Grundidee ist eine kontinuierliche Anreicherung des Planungsmodells mit Attributen (semantische Informationen) im Laufe der Planung. Ziel ist das Mittragen von allen schon zugewiesenen Attributen über alle Leistungsphasen bis zur Übergabe des Modells an Bauherr und betreibende Firma (Abbildung 3.9).

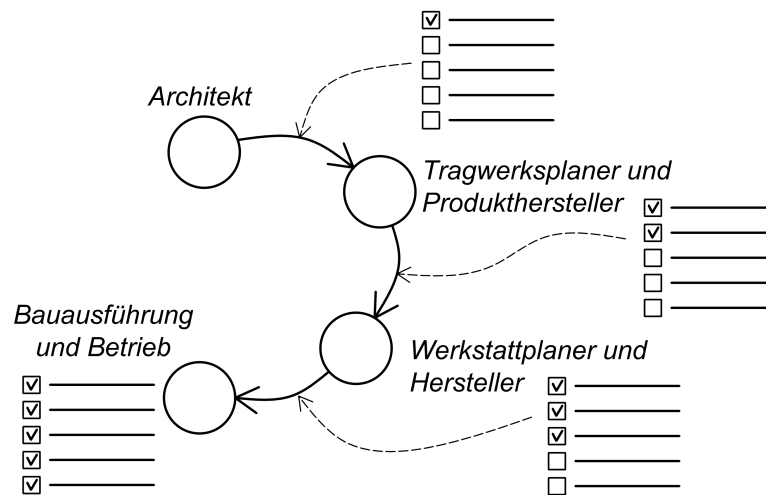


Abbildung 3.9: Anreicherung des 3D-Modells mit Informationen

Gegenüberstellung der API-basierten Vorgehensweise und textlichen Programmierung.

Von Beginn war die Benutzung rein textlicher Programmierung in Grasshopper 3D® mit Bezug auf externe API-Schnittstellen in Erwägung gezogen. Diese weist gegenüber der Verwendung in jedem Softwarepaket vorhandener Export-Austauschformate sowohl Vorteile als auch Nachteile auf. Für einen besseren Überblick sind alle positiven und negativen Auswirkungen in der Tabelle 3.3 vorgestellt

Vorteile	Nachteile
mehr Flexibilität bei Software-Auswahl	Vielfalt an Programminteraktionen und folglich zusätzliche Codeänderungen
Direkte Anbindung	Lange Einarbeitungszeit
Wiederverwendbarkeit des Codes	

Tabelle 3.3: Positive und negative Folgen der Verwendung textlicher Programmierung statt nur Export-Austauschformate

Obwohl textliche Programmierung insgesamt mehr Freiraum bietet, wird sie in meiner Arbeit aus zeitlicher Beschränkung nur begrenzt benutzt.

3.3.2 Anbindung an die Berechnung

Dlubal RFEM

RFEM ist die Programmbezeichnung modulbasierter Software für die Berechnung räumlicher Tragwerke sowie Formfindung leichter Seil- und Membranstrukturen. Zum Zeitpunkt dieser Masterarbeit hat sich die Firma Dlubal Software GmbH mit ihren Programmen etabliert und bietet eine immer breiter werdende Palette an Lösungen für die Formfindung, für die statische und dynamische FE-Analyse.

Nicht zuletzt ist der hohe Vertrauensgrad der Dokumentation und Transparenz von durchgeführten Berechnungsschritten zu verdanken. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Recherche zeigte, dass die für Grasshopper 3D[®] verfügbaren Analyse-PlugIns im Bereich der Nachvollziehbarkeit der einzelnen Berechnungsschritte im Vergleich zu RFEM noch Defizite haben.

Auch nicht zu unterschätzen ist die Ergonomik bei der Programmbenutzung. Eine ergonomisch durchdachte Benutzeroberfläche lässt dem Ingenieur seine Zeit den eigentlichen Ingenieuraufgaben widmen anstatt der Orientierung in der Werkzeugumgebung. In diesem Bereich zeigt RFEM eine gute Performance.

RFEM wird im Laufe dieser Arbeit als von dem Planungsbüro vordefiniertes Berechnungsprogramm verwendet. Die oben genannten Aspekte lassen jedoch Rückschluss über die Anwendung anderer FEM-Pakete als RFEM zu.

Zuerst lohnt sich ein Überblick über die früher entwickelten Austauschformate (Abbildung 3.10).

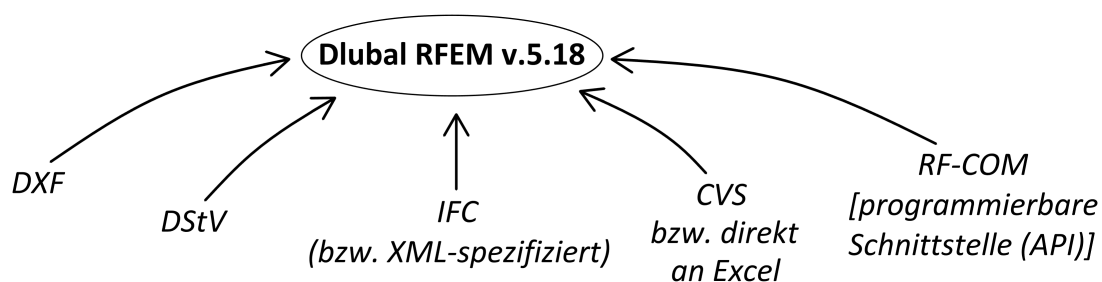


Abbildung 3.10: Überblick über die behandelten Schnittstellen für den Import externer Daten in Dlubal RFEM v.5.18

Im weiteren werden alle aufgeführten Austauschformate bezüglich ihrer Einsetzbarkeit, Vor- und Nachteile behandelt.

DXF

Das DXF-Format ist eines der ältesten Austauschformate. Seine Kapazitäten begrenzen sich auf Linienübergabe. Erweitert für RFEM ist Querschnittszuordnung je nach vordefinierten Layerbezeichnungen möglich. Mit Hilfe von 3DFace können einfache planare Flächen aus drei oder vier Punkten aus dem Liniennetz generiert werden. Wegen unzureichender Flexibilität wird DXF im Weiteren nicht mehr als Austauschformat für Membranbauprojekte untersucht.

DStV-Schnittstelle von Karamba 3D

Das DStV-Format wurde als eine mögliche Alternative mitaufgelistet, da dessen Spezifikation vom Deutschen Stahlbauverband stammt. Die Spezifikation einer DStV-Datei ist eine Textdatei im ASCII-Format (siehe unten noch über verwandte STEP-Ableitung) und eine zertifizierte Schnittstelle für Datenübertragung im Stahlbau (unter anderem auch für CNC-gesteuerte Fertigung).

Diese Schnittstelle lässt sich unter den RFEM Import Formaten finden. Darüber hinaus wurde die von Sebastian Steinegger in seiner Mastearbeit beschrieben (Steinegger 2015, SS.76-84, 133-135). Für den Export der Daten in diesem Format wird eine zusätzliche Erweiterung für Grasshopper 3D[®] benutzt, das Modul Karamba 3D, dessen Möglichkeiten auch bei (Steinegger 2015, SS.76-84, 133-135) ausführlich behandelt wurden.

Karamba3D[®] wäre dann bei unserem Konzept ein zusätzlicher Zwischenschritt zwischen Grasshopper 3D[®] und RFEM, der hauptsächlich dem Zweck Exportbereitstellung dient. Aber die Funktionalität von Karamba 3D kann auch als unabhängiges FEM-Werkzeug für die Vordimensionierung unmittelbar in Grasshopper 3D[®] betrachtet werden. Bei Karamba handelt es sich um ein kommerzielles, nicht kostenfreies Plug-In.

Im Laufe anfänglicher Versuche zeigten sich besondere Probleme, die den effizienten Einsatz Karamba3D[®] nur für die Kombination mit RSTAB oder Autodesk Robot Structural Analysis möglich machen. Zu diesen Problemen gehört unter anderem die Beschränkung auf gerade Stabelemente, bestehend aus nur zwei Punkten (keine Bogenelemente) und nur planare Flächenelemente. Es wird kein bidirektionaler Austausch angeboten (Lediglich aus Grasshopper 3D[®] nach RFEM)(Abbildung 3.11 auf der Seite 61).

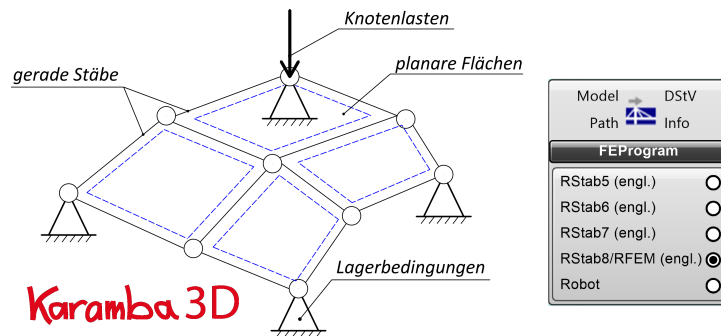


Abbildung 3.11: Die durch das DStV-Format übertragbaren Strukturelemente

Industry Foundation Classes (IFC)

IFC-Dateiformat gehört zu den offenen Austauschformaten. Unter den offenen, oder anders gesagt neutralen Formaten, versteht man solche Formate, deren Spezifikation offen im bestimmten regional geltenden Standard oder frei im Internet veröffentlicht ist und keinem Softwarehersteller gehört.

Im Fall von Industry Foundation Classes gibt es sowohl einen dahinterliegenden Standard als auch frei zugängliche Spezifikationen im Internet, die von der Gruppe „buildingSMART“ gepflegt und aktualisiert werden⁴. Aus dem Grund, dass hinter dem Format der internationale Standard ISO 10303-21 liegt, wird es von den Beteiligten der ganzen Bauindustrie bevorzugt und zunehmend gefordert.

Die IFC-Spezifikation basiert auf der EXPRESS-Datenmodellierungs- und Programmiersprache. Ursprünglich wurde diese Modellierungssprache für den Maschinenbau entwickelt (bekannt als STEP-Format) und erst später, mit der Verbreitung der EDV-gestützten Planung im Bauwesen, in das STEP-Nachfolgerformat IFC übernommen.

Basierend auf dem STEP-Format hat sie einen hierarchischen, klassenbasierten Aufbau. Das STEP-Datenformat (ASCII Format) ist auch als XML-Schema verfügbar ifcXML *.ifc und *.ifcXML Dateien können direkt ineinander umgewandelt werden⁵.

Vergleichsmodell für die Datenstruktur einer IFC-Datei

Die IFC-Spezifikation bzw. das XML-Schema organisiert seine Strukturelemente in bestimmter Weise. Die Strukturelemente obliegen der Speicherung von vorbestimmten Datentypen. Vergleicht man die IFC-Spezifikation mit einem sehr funktionellen Schuhschrank, hat der dementsprechend Zellen in unterschiedlicher Größe und Tiefe. Diese Zellen müssen nach bestimmter Ordnung geordnet und mit Bezeichnungen versehen sein (Abbildung 3.12 auf der Seite 62). Wichtig ist jedoch, dass diese Bezeichnungen bei

⁴ Abgerufen am 2019-07-10 unter <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/ifc-schema-specifications/>

⁵ Abgerufen am 2019-07-10 unter <http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4/final/html/>

unterschiedlichen Softwareprodukten ganz identisch definiert bleiben. Sonst entstehen unvorhersehbare Datenverluste beim Export- und Importvorgang.

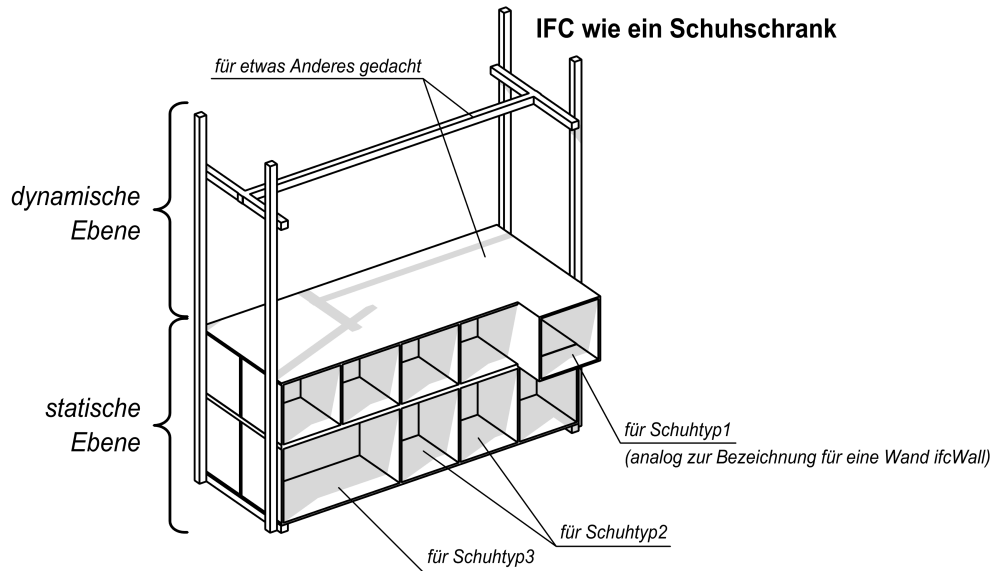


Abbildung 3.12: Vergleich IFC mit einem Schuhschrank

Quelle: Eigene Idee und Darstellung

Die IFC-Struktur mit 700 aktuellen Objektklassen wird im Laufe der Ausarbeitung einer Folgeversion unverändert bleiben und bildet den statischen Teil der IFC-Spezifikation. Die eingefügten Neuerungen können nur alle 3-5 Jahre berücksichtigt werden (Vergleiche hierfür auch die Abbildung 3.13). Aus diesem Grund wurde eine zweite, dynamische Ebene in die IFC-Spezifikation eingeführt (Liebich et al. 2011, S.99).

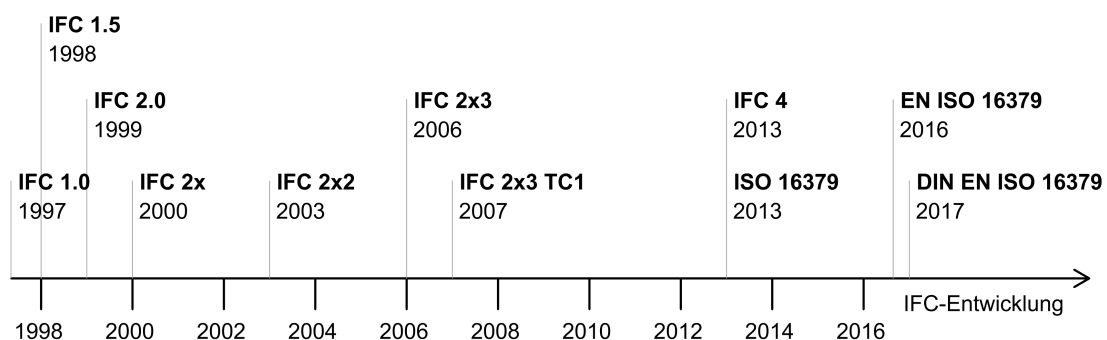


Abbildung 3.13: Entwicklungsstand bei IFC-Format (Stand 2017)

Quelle: In Anlehnung an die Web-Quelle⁶

⁶ Abgerufen am 2019-07-03 unter <http://www.cafm-news.de/ifc-jetzt-auch-europaeische-norm/>

Kein Austausch mittels IFC - Nur Koordination

Änderungen an dem IFC-Schema selbst sind unmöglich. Es werden lediglich die Parameter beeinflusst, nämlich die Geometrie und ihre Attributwerte. Die ursprüngliche Idee des IFC-Formats war nur Koordination und Archivierung der Modelldaten, kein Austausch zum Zweck der weiteren Datenverarbeitung (Baldwin et al. 2018, S.63), (Liebich et al. 2011, S.105).

IFC-Formatkapazitäten werden stetig erweitert und die Spezifikation selbst befindet sich immer noch in Entwicklung ((Schiller, Faschingbauer 2016, SS.27-28). Die letzte Version IFC4 ist zum Zeitpunkt dieser Masterarbeit nur von wenigen Programmherstellern implementiert, wurde aber um viele für den Membranbaubereich wichtige Klassen und Eigenschaften erweitert, und bietet unter anderem die exakte Repräsentationsmöglichkeiten für die NURBS-Flächengeometrien (Abbildung 3.14 auf der Seite 63).

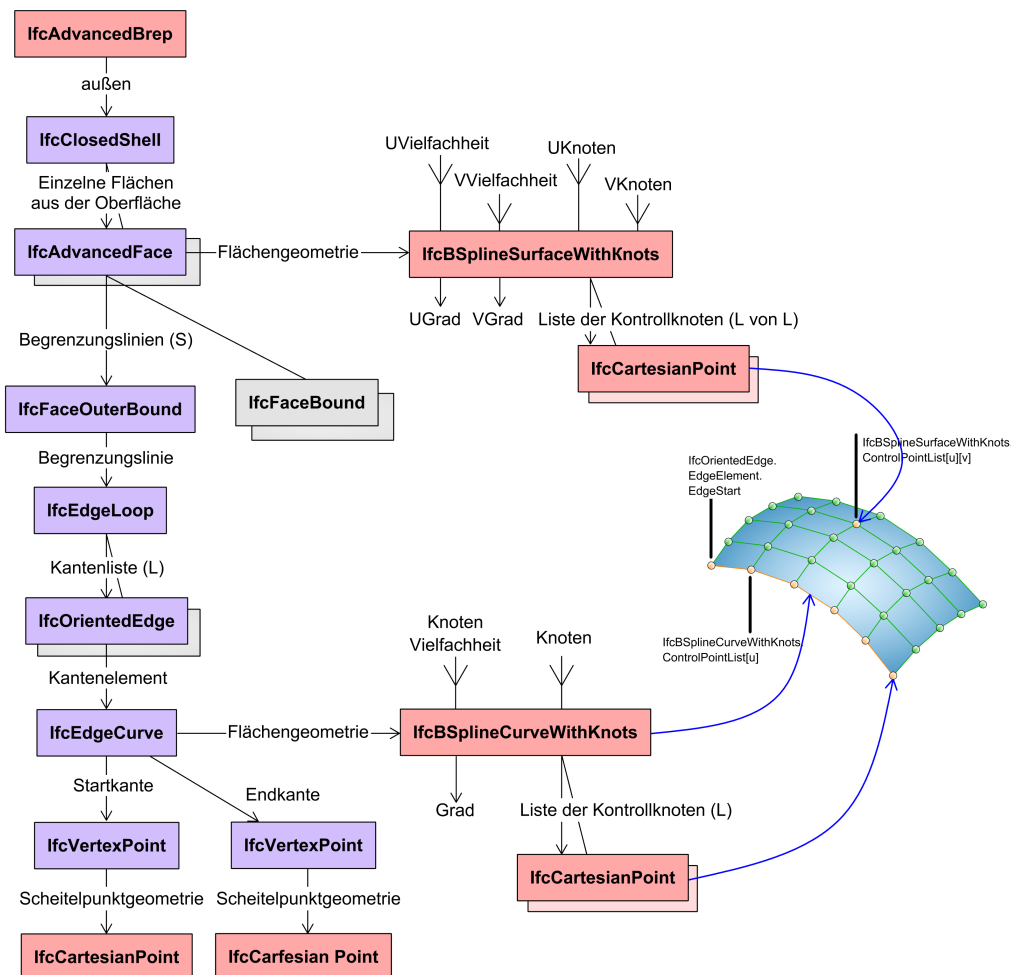


Abbildung 3.14: Erweiterung der Geometriebeschreibung bei IFC4

Quelle: In Anlehnung an die Präsentation von AEC3 Deutschland GmbH⁷

⁷ Am 13.07.2019 abgerufen <https://bim4infra.de/?mdocs-file=6651>

Die zugrunde gelegte (ifc)XML-Spezifikation wird auch von den anderen externen Entwicklern benutzt, um ihre Erweiterungsmodule für Grasshopper 3D[®] mit größerer Funktionalität auszurüsten. Solche Lösungen werden im Abschnitt 3.3.4 auf der Seite 72 näher erläutert.

„Coordination View“ und „Analytical View“

Es gibt zwei grundsätzlich unterschiedliche Versionen: „Coordination View“ und „Analytical View“. In Dlubal RFEM wurde lediglich die IFC-„Analytical View“ Variante implementiert, was auch für eine Berechnungssoftware angemessen und erwünscht ist. Wichtig zu bemerken ist, dass es zum Zeitpunkt dieser Masterarbeit keine IFC-basierte oder XML-basierte Schnittstelle auf dem Markt gibt, die eine IFC-„Analytical View“-Datei für eine RFEM-konforme Projektstruktur generiert.

Aus diesem Grund wurde auf dieses offenes Austauschformat ausgerechnet in Verbindung mit der RFEM-Version 5.18 verzichtet. In Zukunft ist jedoch eine IFC-basierte Schnittstelle für Dlubal-Programme zu erwarten, da offene Formate von der Mehrheit der Modellnutzer bevorzugt werden. Bei der Ankopplung an das Programm Revit[®] wird ein weiterer Bezug zu diesem Format genommen (siehe Seite 72 im Abschnitt 3.3.4).

CSV und Excel-basierte Austauschmethoden

Eine völlig transparente Austauschmethode wäre dann die Benutzung direkter Anbindung an Excel bzw. Abspeicherung der Daten in .CSV-Format. Da dieses Format zum Zeitpunkt dieser Masterarbeit auch bei offenen Datenbankprogrammen verwendet werden kann (wie zum Beispiel „open Writer“), zwingt die beschriebene Methode nicht unbedingt zum „Microsoft Excel“-Ankauf ⁸.

Besonders vorteilhaft wird die Methode jedoch bei der Benutzung in Kombination mit Datenmanagementsystemen, welche ein Bindeglied für die Automatisierung des Datentransfering und der Verwaltung darstellen. Das Prinzip der Datenspeicherung bei einem .CSV liegt in der Abspeicherung der semantischen Daten aus dem Modell als reiner Text. Die Inhalte der einzelnen Felder und Zellen werden durch Zeichen, üblicherweise Komma oder Semikolon getrennt.

Ausgehend von diesem Prinzip kann jede Art der Information aus Grasshopper 3D[®] in Tabellen-konformer Struktur zusammengeführt und bezeichnet sein (Abbildung 3.15 auf der Seite 65). Die einzige Rolle würde dann lediglich die Reihenfolge des Dateien-Imports in RFEM spielen.

⁸ Abgerufen am 26.07.2019 unter www.computerbild.de/artikel/cb-Ratgeber-Kurse-Software-\CSV-Datei-oeffnen-8916518.html

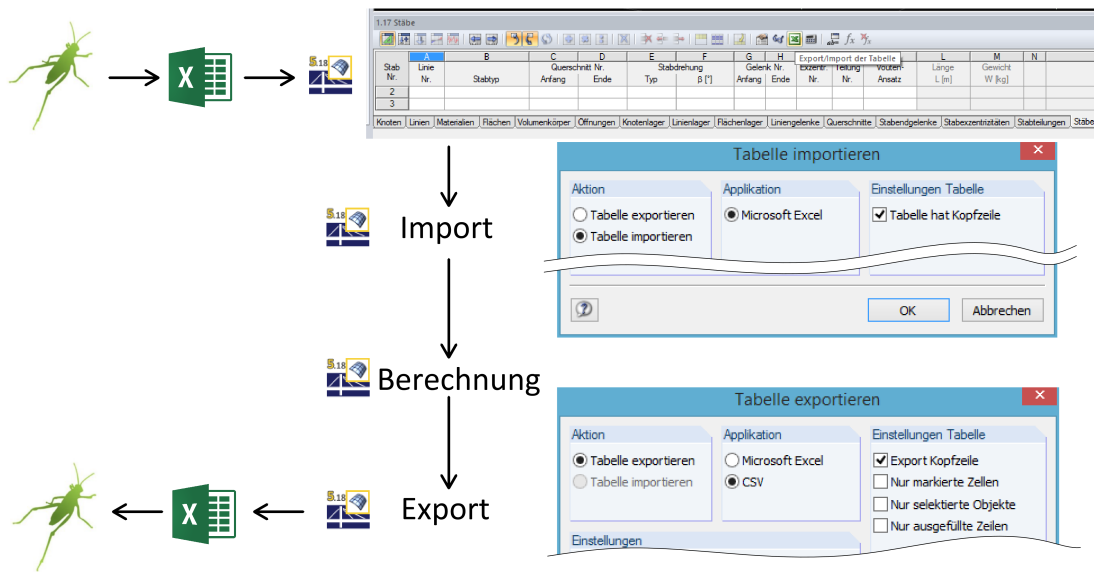


Abbildung 3.15: Schematische Darstellung der tabellenbasierten Datenübertragung

Bei all den Vorteilen bleibt diese Methode jedoch so umständlich, dass man unumgänglich nach den Möglichkeiten des direkten RFEM-Zugriffs sucht. So stellt diese Methode eine Brücke zum komplett programmierungsbasierten Ansatz da.

Programmierbare Schnittstelle RF-COM von Dlubal

Dem Wunsch der Anwender nachkommend entstand ein Extramodul für die Programme RSTAB und RFEM, welches Zugriff auf COM-Interface ermöglicht. Im Fall der Benutzung von RFEM heißt das Modul RF-COM. Mithilfe von C-Sharp oder Visual Basic Programmiersprachen werden die von Dlubal zur Verfügung gestellten Objektklassen, Methoden und Attribute herangezogen, um sich eine Datenübertragung zu verschaffen.

Parametrische Modellierung mit visueller Programmierung in Grasshopper 3D[®] bildet den Grundbaustein der effizienten Anwendung des oben beschriebenen RF-COM-Moduls (Abbildung 3.16 auf der Seite 66).

RF-COM-basiertes Plug-In „RhFEM“

„RhFEM“ ist ein kostenloses Plugin für Grasshopper 3D[®] mit offenem C#-code. Der Autor Marcis Luksevics machte 2018 eine Studie im Web bezüglich vorhandener Lösungen für Datentransfering aus Rhino3D[®] nach Dlubal RFEM und stellte fest, dass es keine Lösungen für eine schnelle Datenübertragung zwischen Rhino3D[®] und RFEM gab.

So entstanden im Laufe 2018 vier Komponenten für den Schreibzugriff auf die Dlubal-Software für die Autogenerierung von RFEM-Geometrie, basierend auf der Schnitt-

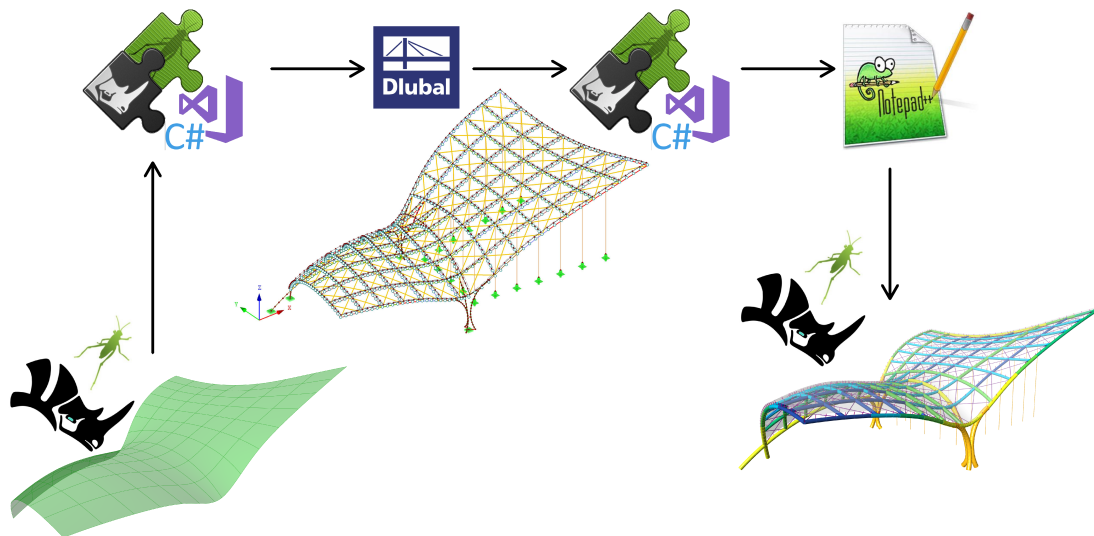


Abbildung 3.16: Bidirektionaler Informationsfluss zwischen Grasshopper 3D[®] und RFEM v.5.18 anhand RF-COM-Schnittstelle

stelle RF-COM und dem parametrischen Modell aus Grasshopper 3D[®]. Zwei weitere „RhFEM“-Komponenten bieten Lesezugriff zu RFEM-Knoten und Linien an.

Diese sechs Komponenten führen Kommunikation mit RFEM-Werkzeugen mittels der in der COM-Schnittstelle verfügbaren Befehle durch. Weitere drei „RhFEM“-Komponenten gewährleisten Möglichkeiten Material-, Querschnitt- und Gelenkzuweisung während des Kommunikationsprozesses aus Grasshopper 3D[®] nach RFEM5.18 zu übertragen. Als Grundlage für ihre Funktionsfähigkeit werden in „RhFEM“ intern gespeicherte Material- und Querschnittskataloge verwendet.

In gegensätzlicher Richtung können „RhFEM“-Komponenten keine Materialbezeichnungen und Querschnitte aus RFEM-Tragwerksmodell übernehmen. Das Plugin generiert in Grasshopper 3D[®] lediglich Listen mit Knoten und einfachen Linien, bestehend aus zwei Endknoten.

Wie bei jeder softwareübergreifenden Lösung gibt es bei „RhFEM“ wichtige Randbedingungen, wie die Ausführbarkeit nur mit bestimmten Rhino3D[®] und Grasshopper-Versionen, eine begrenzte Auswahl an katalogisierten Querschnitten, Forderung nach einer gültigen Dlubal-Lizenz mit RF-COM-Modul, Maßstababhängigkeit, Unterstützung ausschließlich planarer Flächegeometrie und gerader Linien (keine Polylinien).

Diese Einschränkungen können auf verschiedene Art und Weise eliminiert werden. In den nachfolgenden Abschnitten wird gezeigt wie die Ausweitung der „RhFEM“-Funktionalität durch eigene C#-Programmierung und Korrektur des vorhandenen Quellcodes hier Abhilfe schaffen kann. Dank der Veröffentlichung des Codes unter den „GNU General Public

License“ Bedingungen kann jeder Nutzer auf den Erfahrungsschatz des Autors zugreifen und diesen für sich nutzbar machen.

Die begrenzte Anzahl an Katalogeinträge stellt kein Hindernis für die Übertragung benutzerspezifischer Querschnitte und Materialien. Jeder Querschnitt kann manuell in Grasshopper 3D® eingegeben und durch das Anschließen an die Komponente der Querschnittsauswahl zu der Zuordnungsliste hinzugefügt werden. Einzige Vorbedingung ist, dass dieser Querschnitt in RFEM entsprechend im Katalog vorhanden ist und die eingegebene Querschnittsbezeichnung mit der aus dem RFEM-Katalog übereinstimmt (Abbildung 3.17 auf der Seite 67).

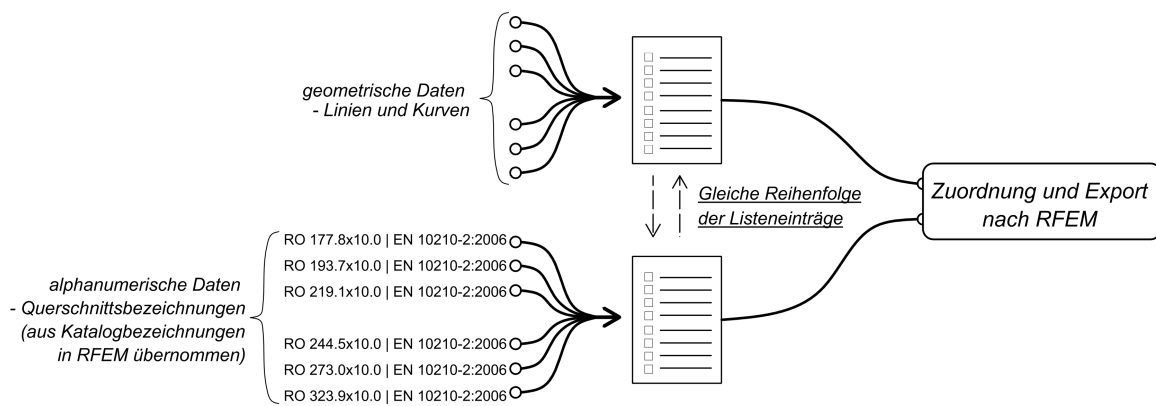


Abbildung 3.17: Zuordnung geometrischer und semantischer Daten zueinander

Zusammengefasst sind übertragbare Elemente in der Tabelle 3.4 dargestellt

Elemente zum Export/Import	Linien	Polylinien	Splines	Querschnitte	Materialien	Starrstäbe	Gelenke	planare Flächen	NURBS-Flächen	Lager	Belastungen
Export aus Grasshopper 3D® nach RFEM	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗
Import in Grasshopper 3D® aus RFEM	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗

Tabelle 3.4: Überblick über von „RhFEM“ übertragbare Elemente

Aus der Tabelle lässt sich fehlende Funktionalität ableiten. Die Abbildung 3.16 auf der Seite 66 zeigt das endgültige Konzept der Interoperabilität zwischen Grasshopper 3D® und RFEM, das in dieser Masterarbeit erarbeitet wurde.

Angesichts der Membranbauanforderungen wurden folgende Aspekte zusätzlich zu den bereits bestehenden abgedeckt:

1. Übertragung räumlich gekrümmter Flächen aus Grasshopper 3D[®] nach RFEM
2. Übernahme Querschnittsabmessungen für Hohlprofile (Außendurchmesser und Rohrdicke) in Grasshopper 3D[®] aus RFEM

Im Kapitel 4 wird praktische Umsetzung noch ausführlich erläutert.

Produkthersteller in frühen Leistungsphasen. Einfluss auf Tragwerksplanung

Bei den bisherigen Überlegungen blieb die Frage nach herstellerbezogene Informationen unberührt. Sie werden je nach Relevanz für tragwerksplanerische Aufgaben in die parametrische Modellierung einfließen.

Die endgültige Anreicherung des Modells mit Informationen sollte weitestgehend im native BIM-Format erfolgen. Dies entspricht auch der Idee über die angenähert einzige Informationsquelle für alle Beteiligten (obwohl diese Quelle noch nach Verantwortungsbereichen oder aus urheberrechtlichen Gründen geteilt sein kann).

3.3.3 Werkstattplanung

Zu den ältesten und auch altbewährtesten Konzepten für die Werkstattplanung gehören AutoCAD-basierte Erweiterungen. Diese wurden meistens intern in jedem Unternehmen entwickelt und erfüllen oft bis heute ihren Zweck. Diese Programmmodule haben oft auch Anbindung an die Tabellenprogramme oder Datenbanksysteme als eine zentralisierte Baukatalogbasis.

Die Detaillierung und annotationsreiche Planausgabe für die Bauteilanfertigung im Werk bedarf einer speziellen Funktionalitätsgruppe in der verwendeten Software. Diese Funktionalitäten sind oft bei den BIM-Programmen nicht in ausreichendem Maße vorhanden. Aus diesem Grund weicht man zu den Softwarepaketen aus, die ursprünglich aus dem Maschinenbaubereich kommen, wie zum Beispiel Inventor®. Gleichzeitig entstehen Bedenken in Verbindung mit dem Kostenfaktor wegen Anzahl der anzuschaffenden Programme. Dies ist der Hauptgrund für die Suche nach einem universellen Softwarepaket, das sowohl BIM- als auch Werkstattplanungsanforderungen erfüllen kann.

Anordnung der Werkstattplanung in der BIM-Prozesskette

Erstmal stellt sich die Frage, ob die Kommunikation mit den Werkstattplanern durch eine (vertraglich) vordefinierte BIM-Umgebung funktionieren soll oder durch eine Grasshopper-Rhino-Kombination, die aus den im Abschnitt 3.3 auf der Seite 54 erörterten Gründen als unsere Kernsoftware im Konzept bestimmt wurde (Abbildung 3.18). Die Antwort auf diese Frage hängt stark davon ab, ob diese Planungsphase intern im Planungsbüro durchgeführt werden soll oder extern vergeben wird.

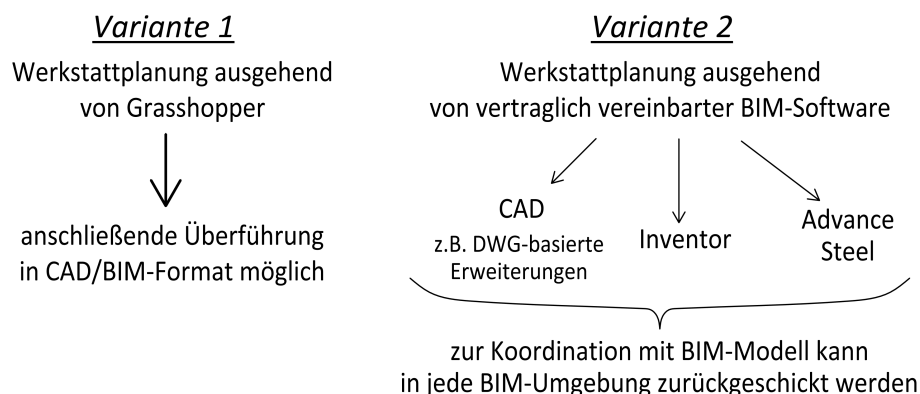


Abbildung 3.18: Untersuchte Varianten der Werkstattplanungseinbindung

Auch nicht zuletzt ist zu erwähnen, dass ein Tragwerk aus mehreren Teilbereichen bestehen kann, die zwischen einander interagieren, aber von verschiedenen Planungsbüros geplant werden (Abbildung 3.19 auf der Seite 70). In diesem Fall wäre es auch aus Grün-

den möglichst frühzeitiger Koordination sinnvoll, alle Teilmodelle in einer gemeinsamen Umgebung zusammenzuführen. Für weitere Informationen zur Abgrenzung der Verantwortlichkeiten wird auf den Abschnitt 3.2.1, Seite 47 hingewiesen.

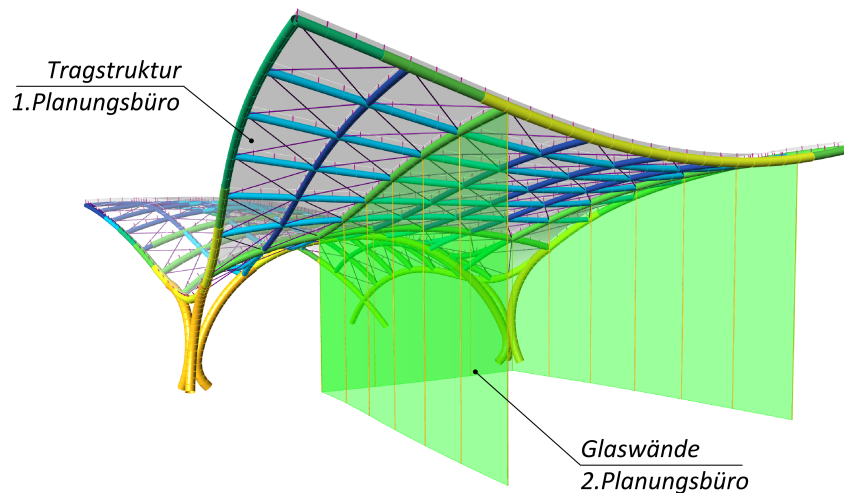


Abbildung 3.19: Arbeitsverteilung auf mehrere Planungsbüros. Frühzeitige Koordination ist notwendig.

Im Beispielprojekt wird die Ausarbeitung auf die erste Variante beschränkt (Abbildung 3.20). Das hilft den Reifegrad der Rhino-Grasshopper-Kombination für die Erledigung der werkstattplanerischer Aufgaben zu bewerten. Variante 2 bleibt für weitere Abschlussarbeiten offen und wird in dieser Masterarbeit nicht näher behandelt.

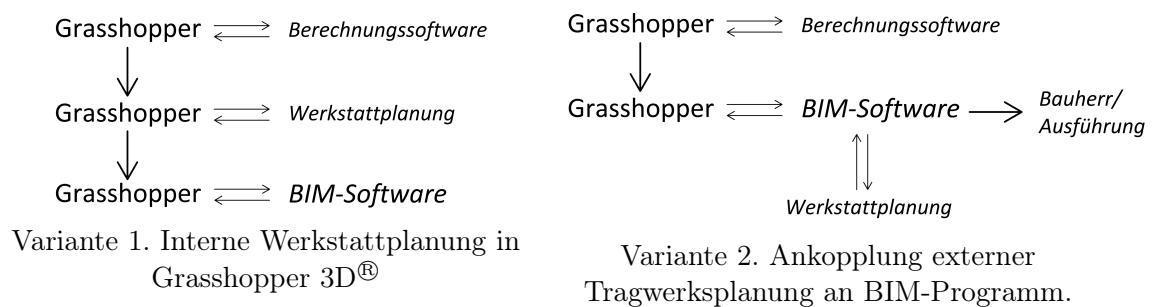


Abbildung 3.20: Varianten der Eingliederung der Werkstattplanung in BIM-Datenfluss

Da Rhino3D® über eine breite Palette an Exportformaten verfügt, wird detaillierte Geometrie aus Grasshopper 3D® layerbasiert für die Dokumentierung (das Beschriften und Bemaßen) in ein konventionelles CAD-Programm exportiert oder idealerweise in ein Teilmodell in der vertraglich vereinbarten BIM-Umgebung. In Zukunft kann das Beschriften und Bemaßen auch unmittelbar in Grasshopper 3D® und Rhino3D® erfolgen. Im Abschnitt 5.4.2 und Kapitel 6 wird das praktische Vorgehen ausführlicher beschrieben.

3.3.4 Vergleich BIM-Softwarepakete

Die abschließende Etappe der ganzen Planung bildet die Überführung des Modells in die geforderte BIM-Umgebung. Je nach vordefiniertem Programm öffnen sich Auswahlmöglichkeiten für den Export. In diesem Abschnitt wird ein kurzer allgemeiner Überblick über die getesteten Exportmethoden gegeben.

Zuerst werden mögliche Kombinationen definiert, die im Folgenden (Abbildung 3.21) tiefergehend beleuchtet werden. In den folgenden Abschnitten wird jedes aus diesen drei Programmen kurz vorgestellt. Praktische Bezüge werden anhand des Beispielprojekts hergestellt.

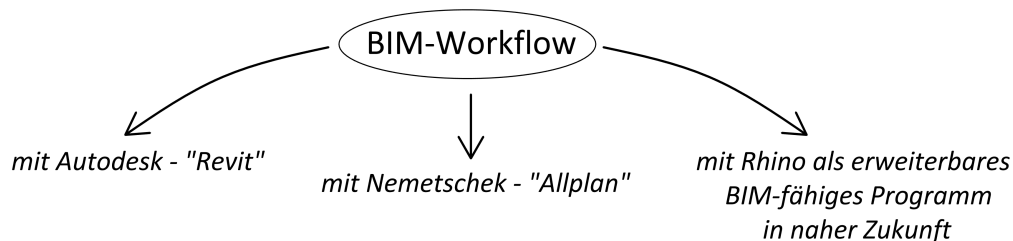


Abbildung 3.21: Überblick über für BIM-Konzeptsuche ausgewählte Softwarepakete

Revit

Der einfachste Weg wäre die Benutzung des Native-Formats der Geometrieobjekte. Bei Verwendung des 3dm-Dateiformats aus Rhino3D®, das direkt in Revit® importiert werden kann, wird die Geometrie als ein Referenzobjekt eingefügt und kann nicht mehr in eine z.B. adaptive Familie überführt werden. Außer dem Import existiert noch eine zweite Vorgehensweise in Revit® externe Dateien zu integrieren, indem man Dateien in ihrem externen Dateiformat öffnet, was beispielsweise vom IFC Format erlaubt wird. Für Rhino 3dm Dateien existiert diese Möglichkeit nicht.

Aus diesem Grund wurden Software-PlugIn-Konstellationen mit dem Ziel einer möglichst effizienten Bedienung gesucht, die den Export der geometrischen und alphanumerischen Daten nach Revit® ermöglichen. In Betracht wurden sowohl ältere Formate wie DWG gezogen als auch sich in Entwicklung befindende IFC oder Revit-API-basierte Plugins für Grasshopper 3D®.

In der unten vorgestellten Tabelle sind die getesteten Konstellationen zusammengefasst und mit den Bemerkungen bezüglich ihrer wichtigen Merkmale versehen (Tabelle 3.5). Die Reihenfolge ist alphabetisch geordnet. Die in der Arbeit weiterverwendeten PlugIns Geometry Gym (für Linienelementeübertragung) und GRevit® (für Flächenübertragung) werden im Kapitel 4 ausführlich behandelt. Der allgemeine Workflow besteht aus zwei unabhängigen Import-Schritten, die in einem geöffneten Revit-Projekt ausgeführt werden

(Abbildung 3.22 auf der Seite 72).

Name	Anmerkungen	endgültig genommen
Conveyor	Revit-API-basiert; direkte Anbindung Rhino-Revit; keine Demoverionen verfügbar	✗
Geometry Gym	IFC-basiert; nur planare Linienelemente als Skelettbauelemente-Familien; Flächen als MassFamilie	✓
Grevit	Flächen als adaptive Familie mit individuell einstellbarer Anzahl an adaptiven Knoten; Open-Source	✓
Hummingbird	basiert auf .CSV-Format; MassFamilien	✗
Konstru	Cloud-serverbasierte Umwandlung	✗
Mantis Shrimp	Dynamogebundene Übertragung; letzte Dynamo-Versionen nicht mehr unterstützt	✗
RhinoInside	in Entwicklungsphase; Revit-API-basiert; nur für Rhino 7 WorkInProgress-Version-Nutzer zugänglich	✗
Rhynamo	verbunden an Dynamo in Revit; open-source	✗
.SAT-Format	nur Flächenelemente	✗
Speckle Works	verbunden an Dynamo; open-source (MIT-Lizenz)	✗

Tabelle 3.5: Überblick über die getesteten Plugins für Revit

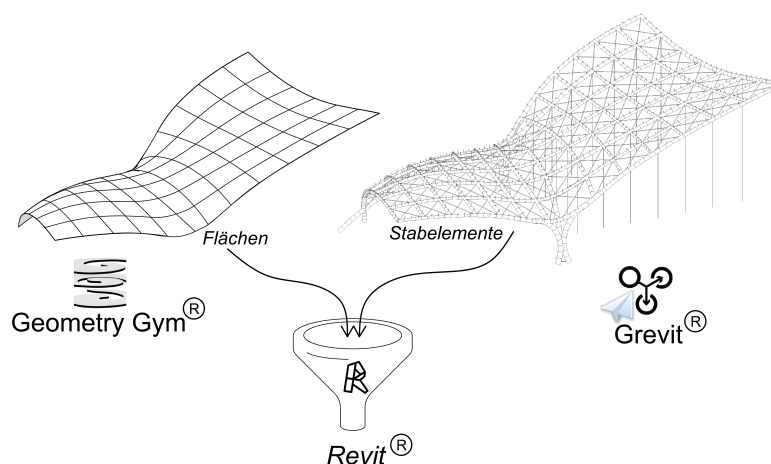


Abbildung 3.22: Anwendung zweier verschiedener Schnittstellen für Stabelemente und für Flächenelemente beim Import nach Revit.

Geometry Gym®

Eine erste Erläuterung des Aufbaus des IFC-Formats kann dem Abschnitt 3.3.2 auf der Seite 61 entnommen werden. Im Grunde genommen wird mittels Pluginmechanismus eine mit IFC-Spezifikation konforme Datenstruktur aufgebaut. Die Spezifikation sowie das Format gewährleisten den Datenaustausch nach openBIM⁹-Prinzip. Das openBIM-Prinzip bezogen auf das Datenformat bedeutet, dass die Datenstruktur in der zu übertragenden Datei offen für alle ist, und wird im Laufe des Aufbaus nicht verschlüsselt. Somit werden die Geometrie und semantischen Attribute der Modellobjekte durch das sogenannte IFC-Schema beschrieben, das frei veröffentlicht ist und von jedem Menschen mit Programmierkenntnissen verstanden werden kann.

Was von dem Autor Jon Mirtschin in seinem Plugin gemacht wurde, ist die Generierung nicht nur IFC-Schema-konformer Elemente, sondern auch die Erweiterung der Übertragung um zusätzliche Optionen, z.B. :

- parametrische Abhängigkeiten, wie es anschaulich im Video „Objektbibliotheken: Warum sind sie nicht üblich?“¹⁰ gezeigt wurde.
- die analytischen Achsen bei Trägern können nur mit „Geometry Gym®“-Plugin übertragen werden und nicht mit einer konventionellen „IFC Coordination View“-Funktion.
- ein weiteres Beispiel ist die Übernahme von in Revit® existierenden Familien (die Bezeichnung in Revit® und in Grasshopper® muss dabei gleich sein).
- Änderungen bei IFC-Dateien aus der gleichen Rhino/Grasshopper-Datei werden durch die statischen ID's in Revit übernommen.

Der Technical Support von buildingSMART¹¹ gibt lediglich Benutzeranweisungen, aber keine eingehenden Anleitungen zu dem Programmierungsverfahren. Es gibt viele Beispiele in GitHub bei Jon Mirtschin. Im Weiteren lassen sich praktische Beispiele bei „www.stackoverflow.com“ und bei manchen speziellen Projekten in GitHub, wie z.B. „xBIM“ finden.

Jon Mirtschin selber spricht in seinem Vortrag „Objektbibliotheken: Warum sind sie nicht üblich?“¹⁰ von dem großen Aufwand in der Ausarbeitung der Bibliotheken bei IFC-Skripten:

- Sie werden in der Regel nicht „out of the box“ (gebrauchsfertig) oder als zusätzliche

⁹ „openBIM ist mehr als nur der Transfer von Daten nach dem IFC-Schema. Es umfasst eine Serie von Normen, die Terminologien, Prozesse und Datenaustausch-Anforderungen festlegen.“ (Baldwin et al. 2018, S.64)

¹⁰ Abgerufen am 29.06.2019 unter <https://youtu.be/C2SrQ2MB-fw?t=474> und in Deutsch übersetzt (Originaltitel: "Object Libraries, why aren't they Common?")

¹¹ Abgerufen am 29.06.2019 unter <https://technical.geometrygym.com>

Downloads von gängigen Authoring-Anwendungen wie Revit bereitgestellt.

- Die Entwicklung der Bibliotheken braucht viel Zeit und Mühe, deshalb haben sie einen Wert, der das Teilen erschwert.
- Da Bibliotheken typischerweise manuell erstellt werden, stellt die Wartung und Aktualisierung / Koordination viele Herausforderungen dar.
- Proprietäre Authoring-Implementierungen verhindern eine gemeinsame Nutzung (d.h. Revit-Wandtypen sind Systemfamilien).

Der Hauptunterschied zwischen dem in Revit eingebauten Standardimporter für IFC-Dateien und dem Plugin „Geometry Gym“[®] besteht in der Möglichkeit, nur den geänderten Teil des Modells zu bearbeiten, statt das ganze Modell wieder mit den neuen Elementen zu ersetzen. Die Funktionsweise stützt sich auf den Vergleich der Identifikatoren einzelner Elemente und Vergleich der Raumkoordinaten. Auf solche Weise prüft der IFC-Importer von Jon Mirtschin, welche Bauteile noch nicht im Modell waren oder auch welche Bauteile gelöscht oder verschoben wurden, und führt den Erstellungsvorgang nur bei den identifizierten „Unstimmigkeiten“:

„...but the emphasis on the IFC-import, that I’ve developed is it there to update and revise model, not just open an IFC-file or link an IFC-file. So it’s some fundamental differences in that sort of situation.“¹²

Weitere Überlegungen zu möglichen Entwicklungsschritten des Programms Rhinoceros[®] in Verbindung mit Geometry Gym[®] lassen sich im Abschnitt 3.3.6 auf der Seite 77 finden.

Grevit

Dieses Plugin basiert auf dem Prinzip der Bearbeitung von vordefinierten Tabellenwerten. Die Revitfamilie wird von dem Plugin nicht erzeugt. Die muss vom Anwender schon vorher erstellt und in der Revitdatei im Familienstrukturbaum enthalten sein. Die bereitgestellten Punkte aus Grasshopper[®] dienen dem Zweck der Reihenfolgebeschreibung von der zu erzeugenden Geometrie in Revit[®]. Die praktische Verwendung und Abbildungen sind dem Abschnitt 5.4.1 auf der Seite 111 zu entnehmen.

Allplan[®]

In Allplan[®] ist ein direkter 3dm-Dateiimporter eingebaut. Der Importvorgang erfordert lediglich eine layergebundene Strukturierung der Daten in Rhino3D[®], damit Farbenzuweisungen realisiert werden können. Darüber hinaus kann die Allplan-Rhino-Kommunikation bidirektional erfolgen. Der Export aus Allplan[®] erfolgt auch über das 3dm-Dateiformat. Die Übereinstimmung der austauschbaren Geometrien garantiert der Parasolidkern der Firma Siemens PLM[®] Software in Allplan[®]. Die Flächen werden nicht zwangsläufig ver-

¹² Abgerufen am 29.06.2019 unter <https://www.youtube.com/watch?v=1fJbQ2PmhqA>

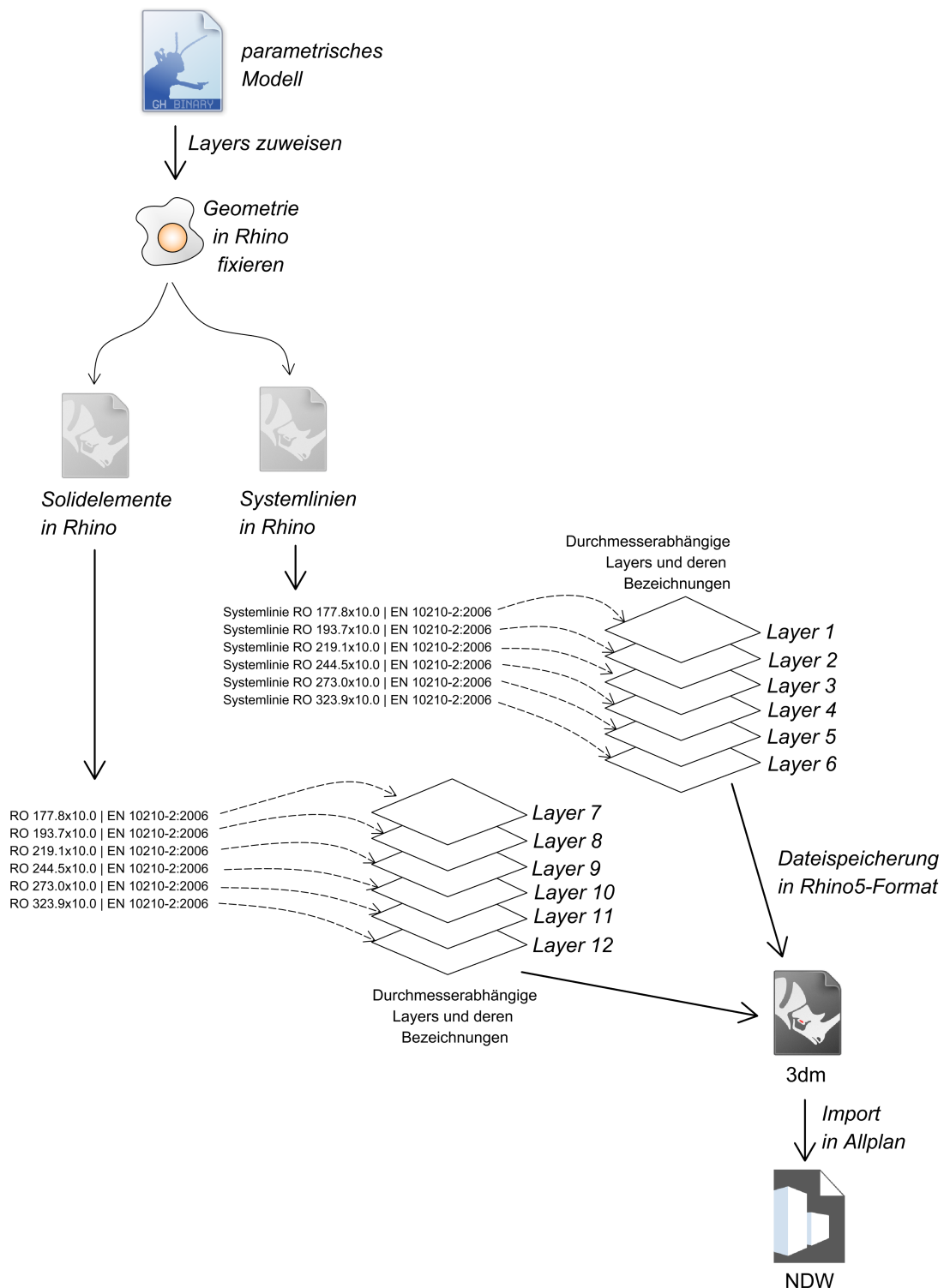


Abbildung 3.23: Rhino-Allplan® Informationsfluss mittels 3dm-Formats

netzt, sondern bleiben exakt beschrieben. Es gibt die Möglichkeit nachträglich parametrische Abmessungen in das Tragwerksmodell einzuführen. Für die Erstellung intelligenter Bauteile in Allplan® wird die open-source Programmiersprache Python verwendet.

3.3.5 Zusammenstellung eines endgültig formulierten Konzepts für BIM im Membranbau

Für die ausführliche Vorstellung im Kapitel 4 wurde folgendes Konzept genommen:

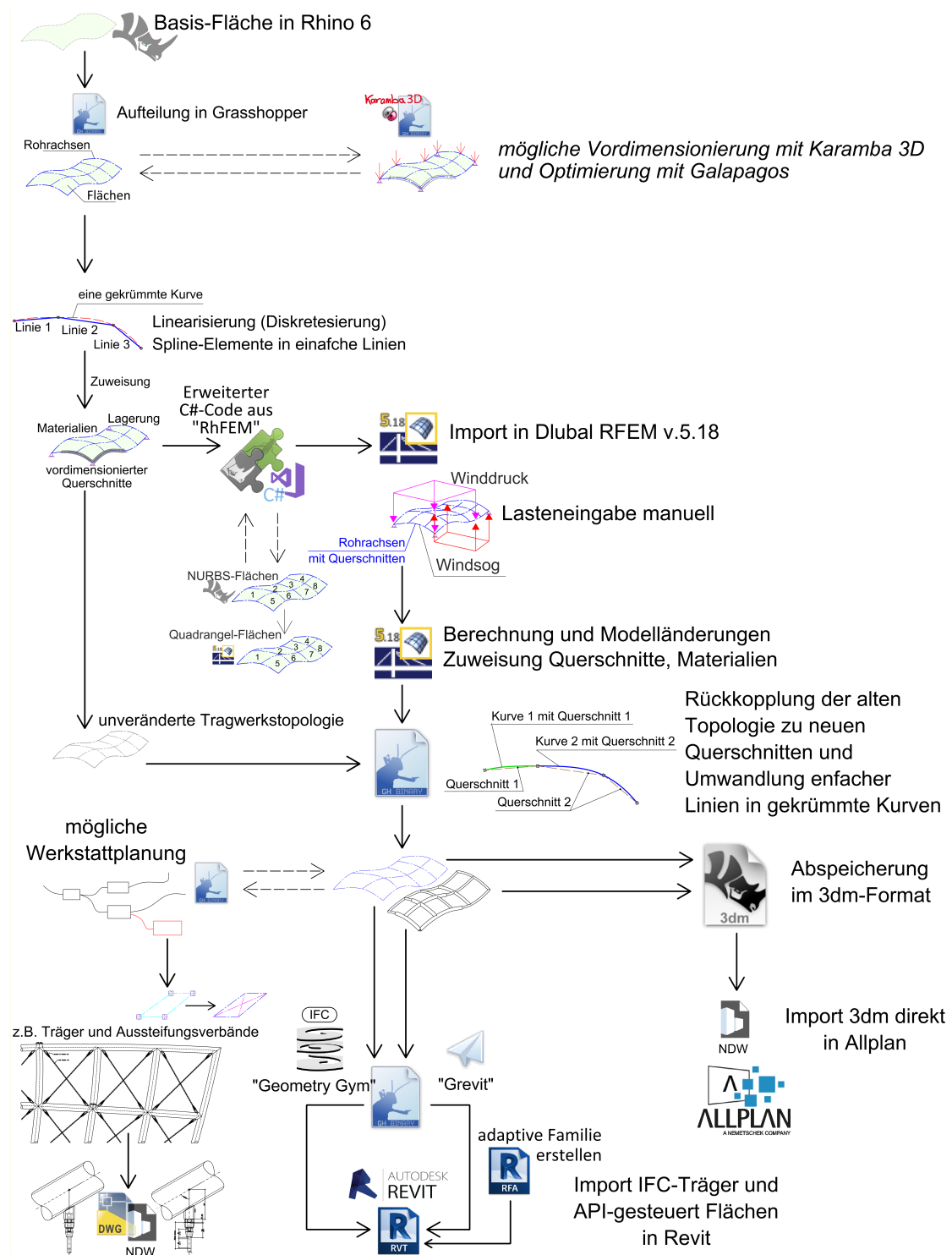


Abbildung 3.24: Konzept für BIM im Membranbau. Allgemeiner Überblick

3.3.6 Ausblick in die Zukunft

Rhino3D® als BIM-fähige Software

Einige Entwicklungen zum Zeitpunkt dieser Masterarbeit, wie die Erweiterung für Rhino „VisualARQ®“ oder die Pluginreihe auf IFC-Basis „Geometry Gym®“ zeigen ein Interesse zur Weiterentwicklung Rhino3D® in Richtung eines komplett BIM-fähigen Programms.

Als eines der anschaulichsten Beispiele dafür lässt sich das Erweiterungsmodul VisualARQ® erwähnen. Dieses Modul bietet eine Benutzeroberfläche für parametrisch-assoziative Objekte aus Grasshopper 3D®. In Grasshopper erzeugte geometrische und semantische Objekte bzw. Attribute werden durch benutzerfreundliche Eingabemasken verwaltet und mit Maus in Rhino3D® abgelegt. Wie es vorher in den Abschnitten 3.3.2 und 3.3.4 gezeigt wurde, gewährleistet darüber hinaus das Plugin Geometry Gym® eine OpenBIM-konforme Arbeitsweise mit Rhinoceros®. Darüber hinaus werden Änderungen der Modelldaten konsistent gehandhabt.

Rolle der freien Software in der Zukunft

Viele open-source Erweiterungen für Grasshopper 3D® zeigen, welche Rolle Programmierungskenntnisse in dem Prozess der Anpassung von Rhino3D® an stark differenzierte Anforderungen der Baubeteiligten in der zukünftigen digitalen Welt spielen. Dies bedeutet eine weitere Annäherung der reinen Ingenieuraufgaben an die IT-Lösungsmethoden. Die Rolle der Bauinformatik wird somit weiter zunehmen, was auch (Steiner 2018, S.129) bestätigt.

Um IT-Fähigkeiten auszubauen, geben die „Reverse Engineering“-Herangehensweise, der Open-Source-Ansatz bei der Bereitstellung und Teilung neuer Arbeitsmethoden und die Gewährung von API- und COM-Schnittstellen für den Zugriff auf softwarespezifischen Funktionen die beste Synergie. Letztendlich bringt das „Sharing“-Handlungsprinzip mehr Gewinn für den jeweiligen Autor als man reflexiv denkt. Zeitlich gesehen ist diese Rendite zwar weit weg von der Periode der Investition, aber der gesellschaftliche Nutzen wird in einem größeren Umfang belohnt.

Rolle des visuellen Programmierens in der Beschleunigung der IT-Beherrschung

Die visuelle Programmierung bildet eine Brücke für diejenigen Bauingenieure, die bei ihrem Studium von den Informatik-Fächern wenig mitbekamen, und wäre auch in Zukunft ein empfehlenswerter Bestandteil der Ausbildung. Darüber hinaus dient die visuelle skriptbasierte Herangehensweise einem weicheren Übergang vom klassischen manuellen Entwurf zu den modernen simulationsbasierten und parametrisch zu optimierenden Planungsabläufen, welche oft mit der Programmierung in einer rein textuellen Programmiersprache eng verbunden sind.

Die Grenzen zwischen den „Visual Scripting“-Programmen werden immer unschärfer. So werden zum Beispiel die von Grasshopper und Dynamo angebotenen Vorgehensweisen immer ähnlicher, was im Endeffekt für zu Gunsten der Nutzer geht, da man in den unterschiedlichen CAD-, BIM- und CAM-Anwendungen die gleichen Algorithmen einsetzen kann.

Der Einsatz von unterschiedlichen Addons erfordert auch die Anwendung und Entwicklung von maßgeschneiderten intelligenten Bauteilen innerhalb von BIM Programmen. Die „intelligenten Bauteile“ innerhalb der BIM-Umgebungen haben ihrerseits spezifische Eigenschaften, die die Zugreifmöglichkeiten in manchen Fällen beschränken können. Solche „intelligenten Bauteile“ können eine simplifizierte User Interface (UI) aufweisen.

Die meisten BIM-Softwarehäuser haben entweder eigene Module für Visual Scripting eingeführt oder eine feste Schnittstelle zu den externen Anbietern hergestellt. Es fehlen noch die praktischen Berichte und detaillierte Fallbeispiele zu deren Umsetzungsstrategien. Diese Schnittstellen müssen noch geprüft, getestet und eventuell verbessert werden.

Dieser Aspekt rechtfertigt den großen Bedarf an Programmierkenntnissen im Verbund mit Bauingenieurwesen-Kenntnissen bei den Ingenieuren. In Zukunft werden solche universelle Mitarbeiter immer mehr gefragt sein. Die Konzentration dieser Mitarbeiter intern in den jeweiligen Büros führt aber noch zu einer gewissen Geschlossenheit des Erfahrungswissens, denn diese Leute und ihre Erfahrung spielen eine besondere Rolle für den Wettbewerbserfolg in langfristiger Perspektive. Der Bedarf an solchen Bauingenieuren-Informatikern ist eine mögliche Ursache dafür, dass die neu entwickelten parametrisch-assoziativen Methoden der Planung noch keinen breiten Einzug in die Praxis nehmen.

Bestensfall werden solche Werkzeuge als Forschungswerk verwendet. Ihre direkte Anwendung bedarf der Akzeptanz von jedem Bauingenieur. Kein Programmierer weiß besser als der Bauingenieur selber, welche Aspekte in seinen Algorithmus einfließen sollen. Deswegen kann nur ein erfahrener Fachmann einen ideal passenden Algorithmus schaffen. Diese Tatsache schließt den Kreis wieder beim Bauingenieur und macht solche Kenntnisse über „Visual Scripting“ bzw. textuelle Programmierung unbedingt notwendig.

Rolle der Interoperabilität bei der interdisziplinären Planung

Das Thema Interoperabilität gehört zu den wichtigsten Prioritäten. Die Rhino-Version 6 bietet aktuell 40 Formate für den Import und 42 Formate für den Export (Stand 2019). In Hinblick auf die programmierbaren Schnittstellen mittels Grasshopper 3D® oder die API-Anbindung bietet Rhino3D® Vorteile, die speziell beim Thema Zusammenarbeit von Bedeutung sind.

Die „cloudbasierte“ Koordination und Zusammenarbeit sowie die Datenversionierung auf verteilten Servern wird in Zukunft immer mehr an Bedeutung gewinnen. Dementsprechend wird sich der Hauptfokus bei der BIM-Technologie auch im Membranbau in Richtung Kollaboration und Fernsteuerung versetzen.

Rhino als BIM-Programm

Neben den lange etablierten Softwarepaketen gewinnt die ursprünglich für freie Modellierung entwickelte Software Rhino3D® an Umfang. Durch die kontinuierlich weiter entwickelten kommerziellen sowie nichtkommerziellen Erweiterungen des Softwarepakets werden immer bessere Funktionen für Bauteilorientiertes Arbeiten geschaffen. Als einfachste Veranschaulichung des Umwandlungsprinzips dient die Abbildung 3.25. Die Grundidee entspricht im großen Ganzen dem Prinzip beim Plugin VisualARQ®

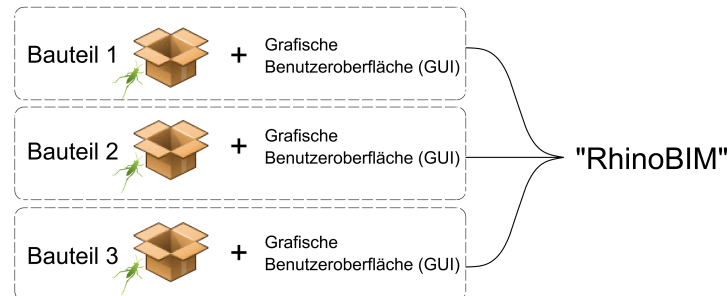


Abbildung 3.25: Rhino als BIM-fähige Software

Die weitere Ausbreitung der Rhino-Funktionalität betrifft:

- Struktur der Ebenen für Gebäude
- Beschriftungsfunktionalitäten (assoziative Annotationsmöglichkeiten)
- Dokumentationswerkzeuge, welche strukturbasierte Planverwaltung sowie Stücklistenverwaltung ermöglichen

4 Beschreibung des praktischen Teils

4.1 Allgemeine Beschreibung des Tragwerks

Die im Kapitel 4 beschriebenen Ansätze zum theoretischen Konzept des Datenaustausches werden in diesem Abschnitt anhand eines vorgegebenen Beispielprojekts angewandt. Hierzu dient ein reales Projekt bei der Firma „IF-Ingenieure für Flächentragwerke“ als konkrete Vorlage.

Bei dem Beispielprojekt handelt es sich um eine Überdachungskonstruktion am Eingang eines Museums. Die architektonische Gestalt des Tragwerks mit den Grundrißabmessungen von 56x18,35 Metern nähert sich einer Doppelflügelform an. Dieses Tragwerk besteht aus dem Trägerrost und oben liegender Membrane. Die Struktur hat viele strukturelle und funktionelle Interaktionen mit den anderen Strukturen, wie dem Museum selbst oder den warteraumbildenden Glaswänden unten.

Im Allgemeinen zeigt die Struktur stark nicht-lineares Tragverhalten, ist geometrisch als Freiform beschreibbar und erfordert an vielen Stellen individuelle, an die lokale Strukturgeometrie angepasste konstruktive Lösungen. Die folgende Abbildung zeigt die Visualisierung der beschriebenen Konstruktion:

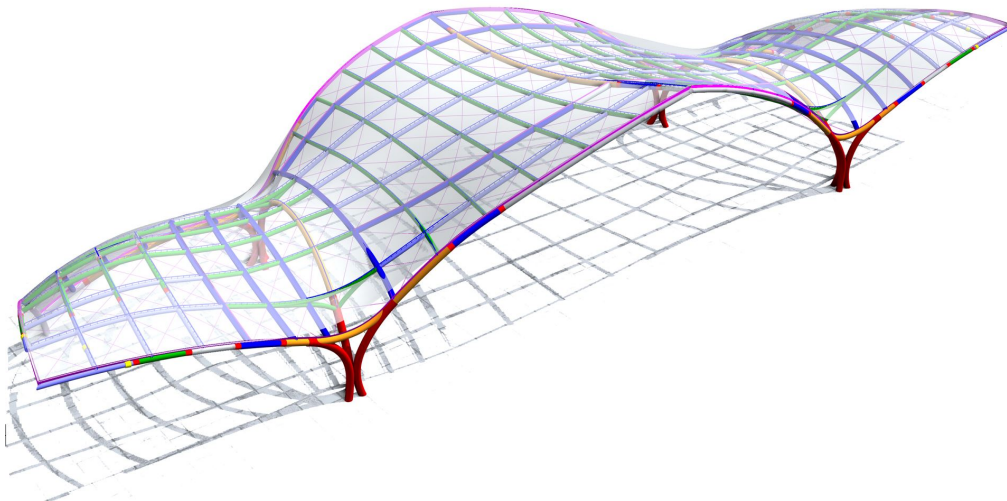


Abbildung 4.1: Allgemeine Darstellung des Projekts

Die Zielaufgabe ist es, die Überdachungsstruktur parametrisch so nachzumodellieren, dass jegliche Änderungen der im Grunde liegenden Flächengeometrie zu den automatischen Änderungen der Tragwerksgeometrie führt. So wird es möglich, Änderungen effizient mit der Berechnungssoftware und einer gekoppelten BIM-Umgebung abzugleichen.

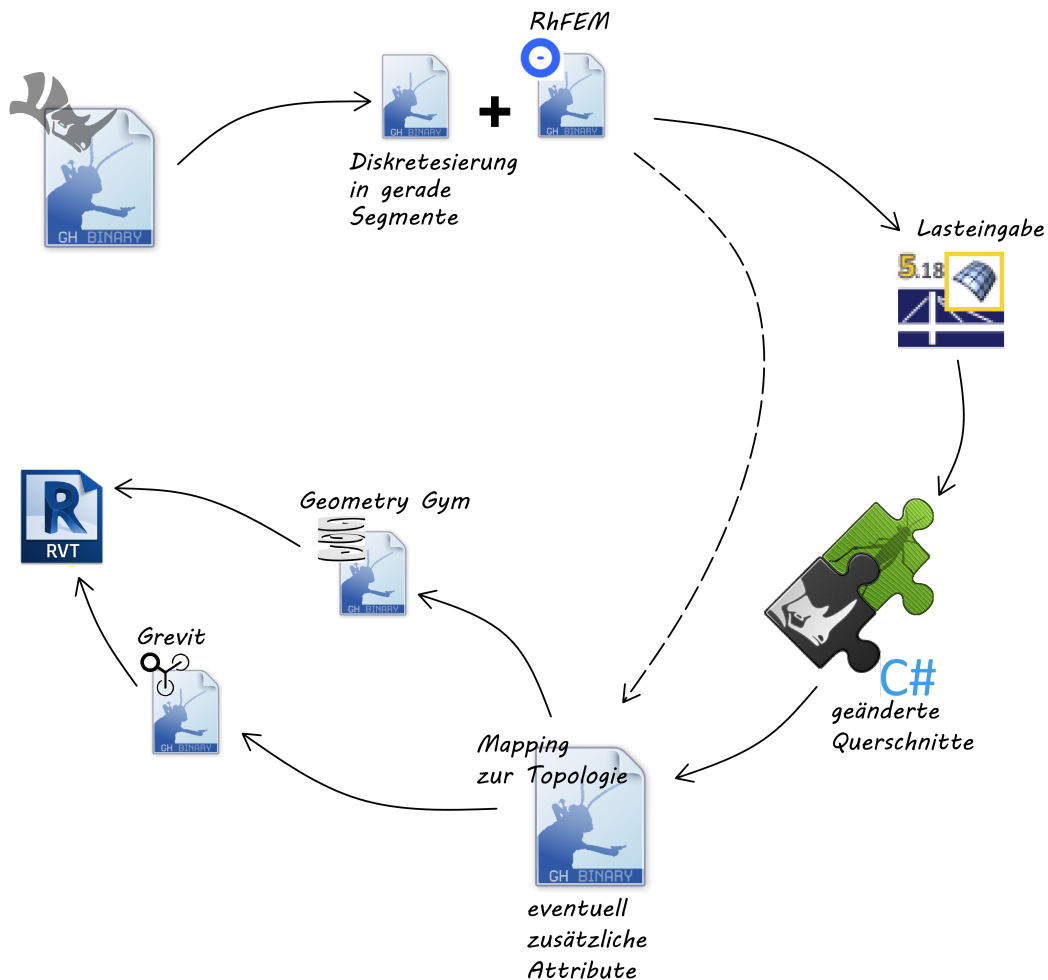


Abbildung 4.2: Kreislauf vom Skript bis zum BIM-Modell

Die Überdachungslänge beträgt dabei 56,0 Meter, die Überdachungsbreite 18,35m. Bogenartige tragende Elemente bilden eine gitterrostähnliche Struktur mit den durchschnittlichen Zellenausmaßen von etwa 2x2 Meter. Vier Unterstützungsbereiche befinden sich an den Rändern des Tragwerks. Zwei weitere Unterstützungsbereiche befinden sich in den zur Museumswand nächstliegenden Tragwerksecken. Die Dachhaut des Tragwerks wird durch eine mechanisch gespannte Membrane realisiert. Die nachfolgenden Abbildungen 4.3 und 4.4 auf der Seite 82 zeigen den Architektenentwurf und seine Lage bezüglich Museumsgebäude.

Als Basis für die Parametrisierung wurden architektonische Entwurfspläne, das zugehörige 3D-Modell, die vorhandene tragwerksplanerische Dokumentation, sowie DWG-Dateien und vorhandene statische und dynamische Berechnungen mit Dlubal RFEM-Dateien verwendet.

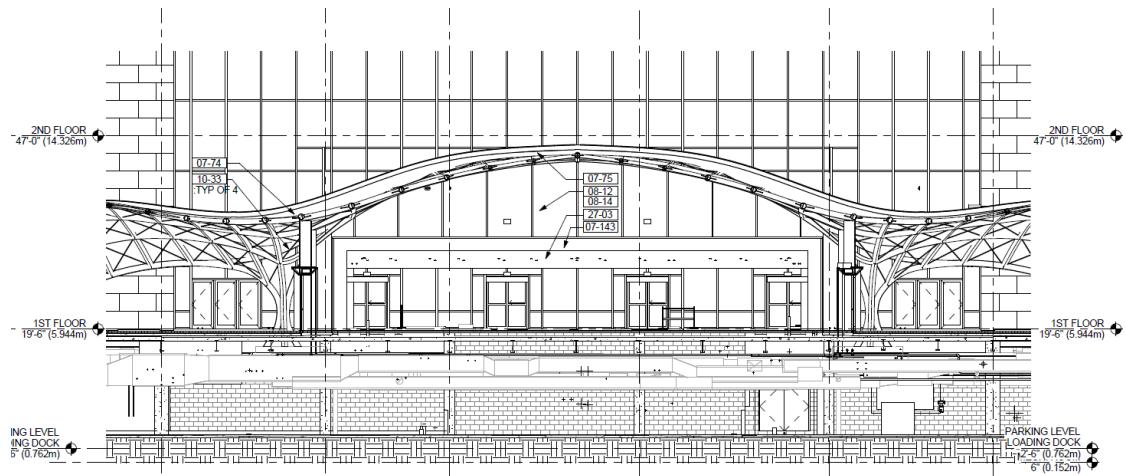


Abbildung 4.3: Fassadenansicht auf den Museumseingang von nördlicher Gebäudeseite
Quelle: Aus dem Blatt 699 (Smithsonian Institution. Office of Facilities Engineering and Operations 2017) übernommen

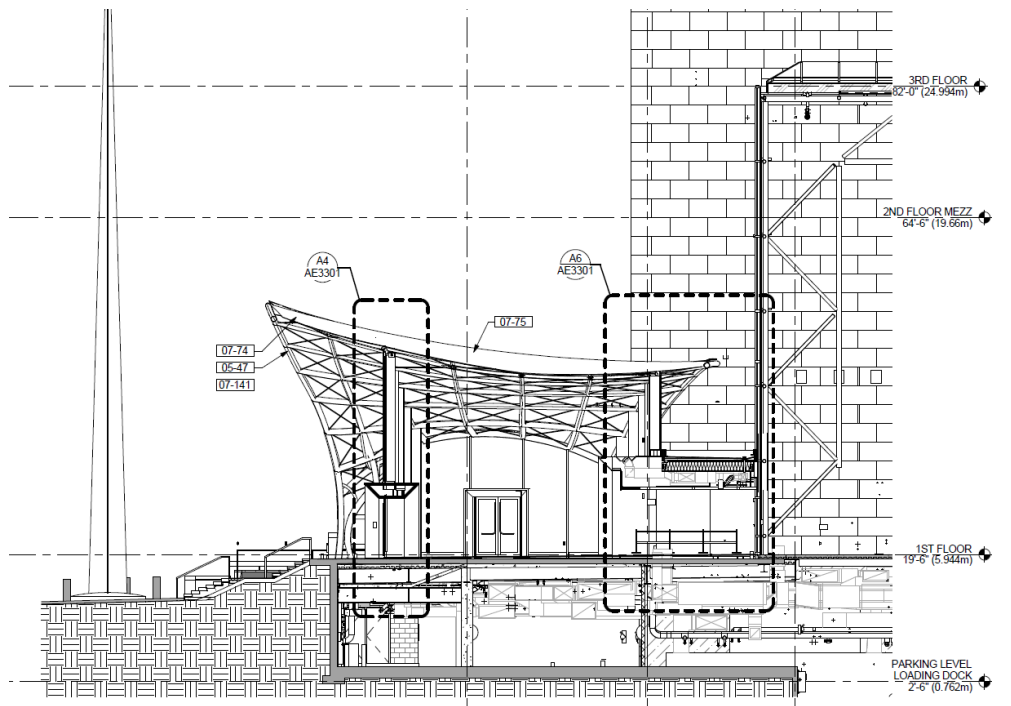


Abbildung 4.4: Querschnitt durch den Museumseingang von nördlicher Gebäudeseite
Quelle: Aus dem Blatt 699 (Smithsonian Institution. Office of Facilities Engineering and Operations 2017) übernommen

4.2 Methoden und Werkzeuge

Die folgenden Werkzeuge wurden für die Konzeptsuche verwendet:

- parametrisch-assoziative 3D-Modellierung mit visueller Programmierung anhand „Grasshopper 3D[®]“-Modul für „Rhinceros 6[®]“
- textuelle Programmierung mit C# als Modifikation eines anderen Addons für Grasshopper 3D[®]
- COM-Schnittstelle von Dlubal für die Ansteuerung des Berechnungsprogramm RFEM-5 mittels C#-Skriptes
- verschiedene Revit-API und IFC-basierte Addons für Grasshopper 3D[®] und Revit[®], die die Übergabe von geometrischen und semantischen Daten ermöglichen.
 - „RhFEM“
 - „Grevit“
 - „Geometry Gym[®]“

4.3 Abgrenzung des Untersuchungsraums

Für die folgenden Analysen wurde eine Hälfte des symmetrischen Tragwerks modelliert. Das prinzipielle Vorgehen ist auf die Gesamtstruktur extrapolierbar. (Abbildung 4.5 auf der Seite 84).

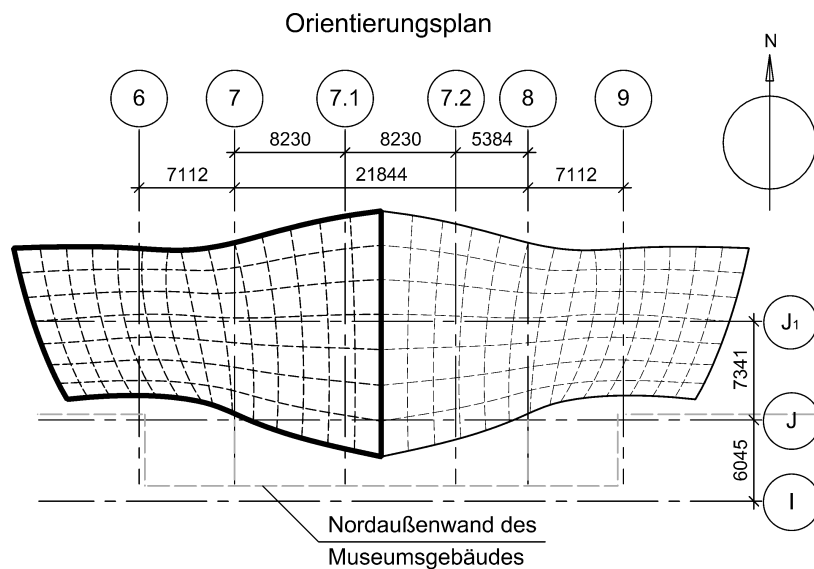


Abbildung 4.5: Linke Tragwerkshälfte im praktischen Teil

Der Fokus wird auf die parametrische Vorgehensweise sowie Übertragbarkeit und Austauschbarkeit der Modelldaten beim Entwurf gesetzt. Die Berücksichtigung der Tragwerksanalyse ist hierbei untergeordnet. Dies spiegelt sich in der Ausführlichkeit deren Beschreibung im praktischen Teil wieder.

Es werden nicht alle Details zur Werkstattplanung bzw. CNC-gesteuerten Produktion vorbereitet. Im visuellen Script werden einige ausgewählte Details modelliert, um die Performance bei der Bearbeitung von großen Modelldaten auszuloten. Die Gesamtgeometrie des Architekten wird im Laufe der Planung nicht angepasst. Die Berücksichtigung der Formfindung und Anpassung im laufenden Planungsprozess wird aber im Kapitel 7 beschrieben.

Die Vordimensionierung kann direkt in Grasshopper®-Rhino® erfolgen. Dafür bietet sich beispielsweise das Grasshopper-Addon Karamba3D® an, was in dieser Arbeit nicht weiter vertieft werden soll. Die Anbindung an die BIM Software umfasst nicht alle für die 4D und 5D Planung notwendigen Informationen, sondern konzentriert sich auf die Anforderungen der Werkstattplanung.

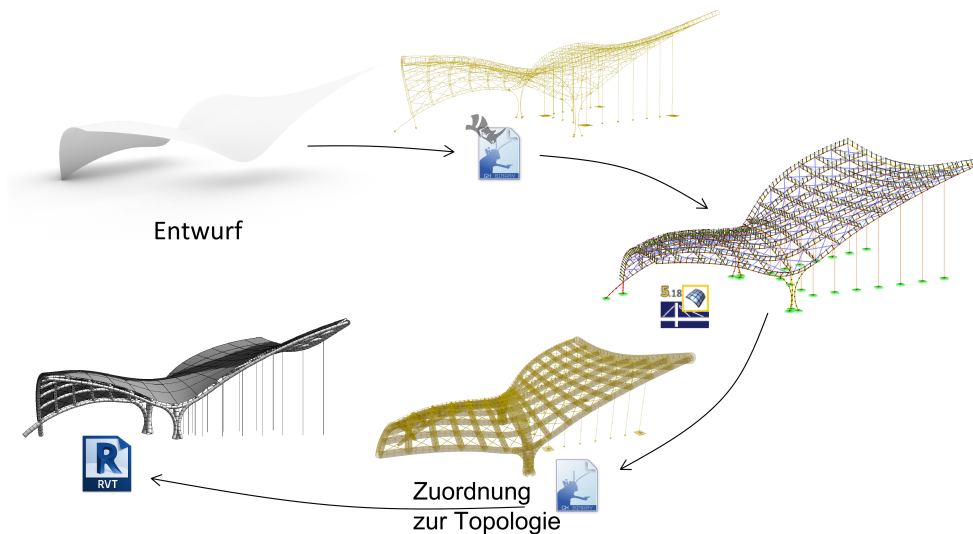
Die aufgezeigte Infrastruktur bietet die Möglichkeit, folgende weitere Themenbereiche zu integrieren:

- Projektsteuerung und Management auf Basis finanzieller und zeitlicher Informationen,
- automatisierte Koordination und Prüfung zwischen verschiedenen Fachplanern,
- Anbindung von Cloud zur Datenerhaltung,
- direkte Ansteuerung von Fertigungsmaschinen mittels CNC Daten.

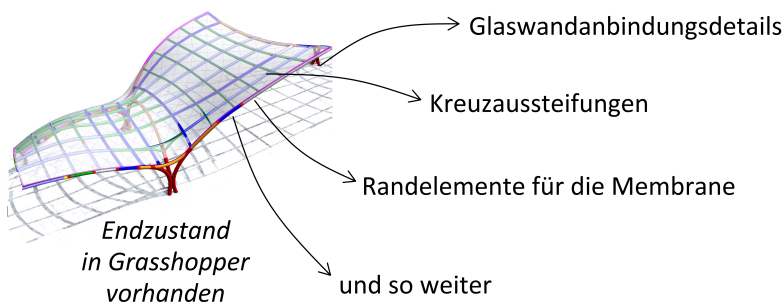
5 Modellierung und Anbindung FEM/BIM

5.1 Allgemeiner Überblick

Die übergeordnete Gliederung ist auf der folgenden Abbildung zu sehen:



a) Teil 1: Von der Form bis zum BIM-Modell



b) Teil 2: Anbindung an Werkstattplanung

Abbildung 5.1: Die übergeordnete Gliederung des Kapitels 5

Dieser Abschnitt widmet sich der Erstellung des parametrisch gesteuerten Modells. Zuerst wird das Tragwerk in Abhängigkeit der gewünschten Flexibilität des Modells in Unterstrukturen einzelner Strukturelemente aufgeteilt, die wiederum mit zusätzlichen für die Strukturanalyse relevanten Informationen angereichert werden:

1) Vollständig flächenabhängige Elemente.

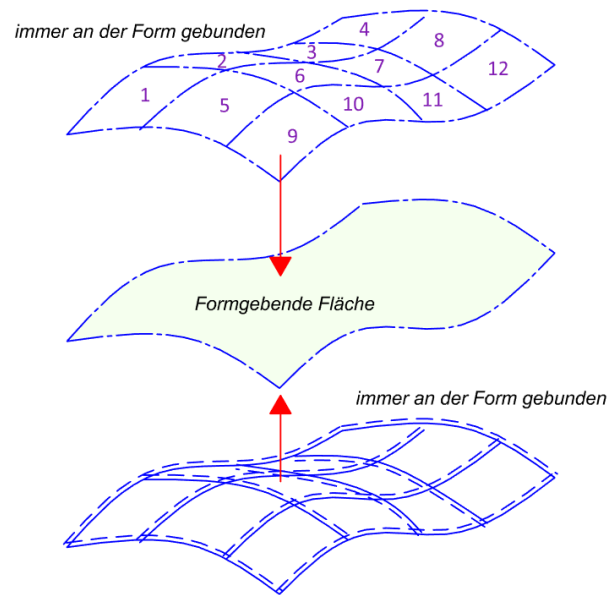


Abbildung 5.2: Vollständig flächenabhängige Elemente

2) Halbmanuell gesteuerte Elemente, wie z.B. Glaswände oder Unterstützungsbereiche (Nummer 2 und 3)

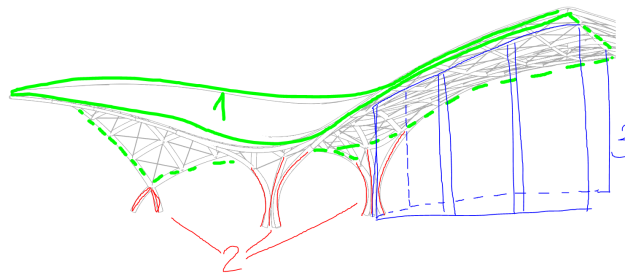


Abbildung 5.3: Halbmanuell gesteuerte Elemente

3) Andere, nichtparametrisch einzugebende Informationen (wie Materialien oder Querschnitte, auch Lagereigenschaften z.B. Drehsteifigkeit)

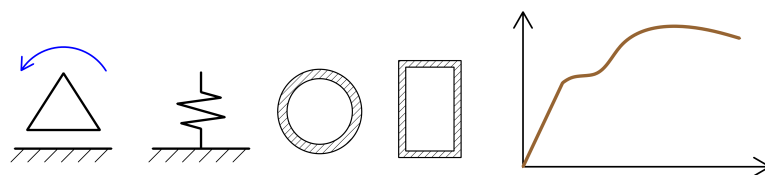


Abbildung 5.4: Nichtparametrisch einzugebende Informationen

5.2 Visuelle Programmierung

In diesem Abschnitt werden die generell zu durchlaufenden Schritte bei der Verwendung der visuellen Programmierung für den Modellaufbau aufgezeigt und vertieft:

Schritt 1

Übernahme einer Form aus einer DWG Datei und Import nach Rhino3D®.

Schritt 2

Wenn die Ausgangsfläche nicht abgeschnitten ist, dann müssen wir einen Wiederaufbau durchführen. Sonst entsteht die Gefahr, diese Fläche später nicht korrekt in einzelne Kurven auflösen zu können. Die ursprüngliche Form der Fläche kann teilweise verändert werden, da die Genauigkeit des Wiederaufbaus von der Anzahl aus der Ausgangsfläche extrahierter Kurven abhängt.

Schritt 3

Unmittelbarer Scripting in Grasshopper3D®:

Für die Erleichterung der Orientierung wird die Grasshopperschaltung in einzelne untergeordnete Abschnitte geteilt. Sowohl Flächen für die eigentliche Membrane als auch für die Diskretisierung der Elemente des Gitterrostes werden erzeugt (Abbildung 5.5).

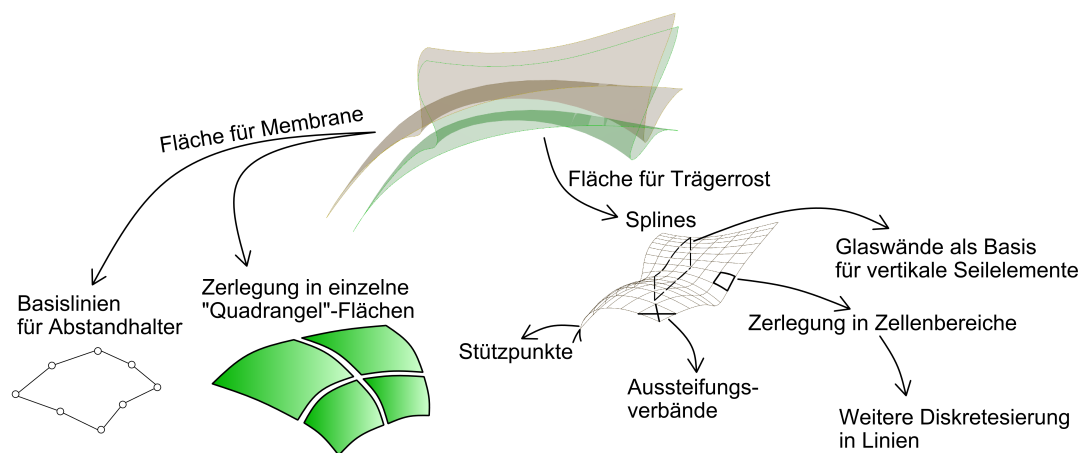


Abbildung 5.5: Aufteilung des visuellen Skriptes in einzelne Abschnitte

Schritt 4

Vorbereitung zur Übergabe nach RFEM [Anknüpfung berechnungsbezogener Daten an die geometrischen Daten] und der Übergabeprozess mittels Grasshopper-Addon „RhFEM“

Schritt 5

Die importierten Daten in RFEM überprüfen und zusätzlich die für den Aufbau eines statischen Modells notwendige Information wie Lasten und deren Kombinationen eingeben.

5.2.1 Detaillierter Workflow von einer Form bis zur Übergabe an das Berechnungsprogramm (Finite Elemente-Analyse)

Die räumliche Grundlage für das Tragwerk bildet eine 3D Fläche, die aus unterschiedlichen Quellen übernommen werden kann. Wie im Abschnitt 4.3 erwähnt, wird das untersuchte Tragwerk aus Symmetriegründen halbiert. Dementsprechend wird auch bei der genutzten Basisfläche lediglich eine ihrer Hälften genommen. Das Tragwerk lässt sich aus den vorwiegend räumlich verlaufenden Trägern mit runden Hohlquerschnitten, drei Unterstützungsbereichen und 3 parallel zu den Trägerachsen vertikalen Glaswänden zusammensetzen.

Um die Geometrie variabel zu halten, wird die Grundfläche durch Kontrollpunkte definiert. Zwar sind Randkanten dieser Fläche als vorgegebene Bedingungen vom Architekt festgelegt, jedoch kann sich die Endform (Stichhöhen und entsprechende Befestigungspunkte am Rand) von der ursprünglichen Idee unterscheiden (Abbildung 5.6). Dementsprechend wird die Anzahl von Trägern parallel und quer zur Längsrichtung der gewählten Endform angepasst.

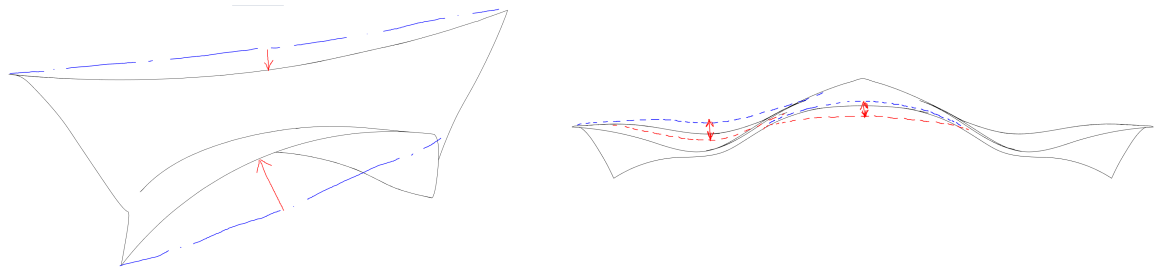


Abbildung 5.6: Einfluss der Stichhöhen auf die Endform

Die erzeugte Tragwerksform ist neben dem architektonischen Gestaltungswillen auch den Anforderungen der zu erreichenden Spannungsverteilung in der Membrane unterworfen. Die Berechnung des Tragwerks schließt zwar keine Formfindung ein, hat aber Einfluss auf die Querschnittswahl. Dadurch beeinflusst die Tragwerksform das final zu optimierende Tragwerksgewicht.

Zu Beginn der visuellen Programmierung muss man die Fläche aus externer Quelle in Rhinoceros® übergeben. Aus der Integration der externen Geometrie ergeben sich für die Planung relevante Fragen (Vergleiche mit der Abbildung 5.7 auf der Seite 90):

- Wie ist diese Flächengeometrie ursprünglich mathematisch beschrieben?
- Kann die Geometrie überhaupt für die weitere Modellierung übernommen werden?
- Ist eine an die externe Ausgangsform angelehnte Neubeschreibung der Geometrie notwendig?

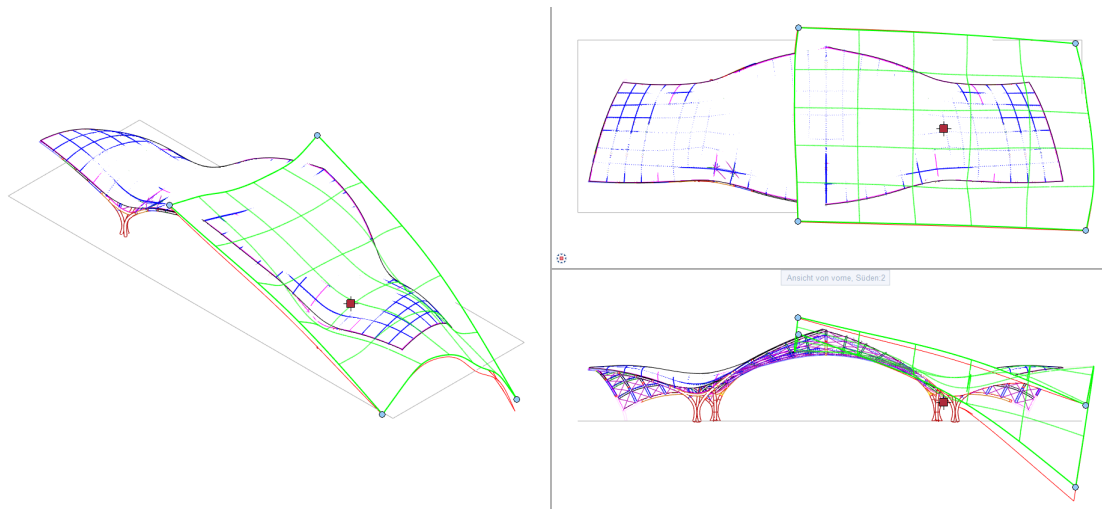


Abbildung 5.7: Die NURBS-beschriebene Geometrie einer unabgeschnittenen Fläche als Basisfläche aus einer DWG-Datei.

Wenn man so eine Fläche direkt in Rhino3D® übernimmt, dann entstehen im Laufe der Modellierung folgende Probleme :

- Nach dem Trimmen der Berandung sieht die Fläche zwar korrekt aus, liefert aber eine nicht zielführende Grundtopologie, das heißt U- und V-Kurven sind nicht interpoliert zwischen den parallelen Rändern verteilt, sondern orientieren sich an der ungetrimmten Basisfläche (Abbildung 5.8).

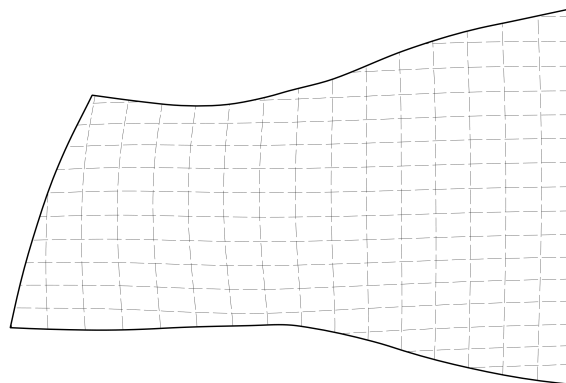


Abbildung 5.8: Direkt übernommene Fläche mit ungeeignetem U- und V-Raster.

- Diese Fläche kann nicht mehr mit den einfachen Werkzeugen visuellen Scriptings „umgebaut“ werden.

Stattdessen muss diese Fläche vollständig den späteren Anforderungen der Planung entsprechend rekonstruiert werden. Zuerst werden mehrere Hilfskurven auf der importierten Fläche entwickelt, mit deren Hilfe durch Verschneidung Kreuzungspunkte extrahiert werden. Diese Punkte bilden die Grundlage für eine neu generierte (in Grasshopper3D®

modellierte) Fläche (Abbildung 5.9 auf der Seite 91).

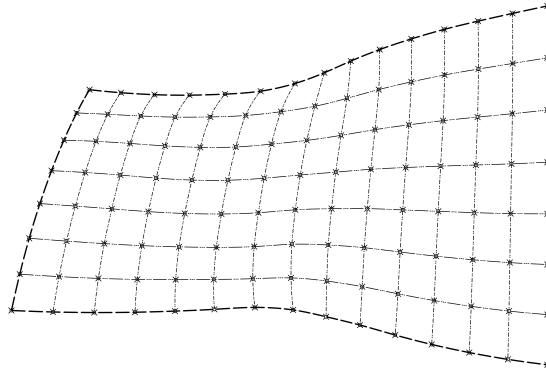


Abbildung 5.9: Rekonstruktion der Basisfläche durch Extraktion mehrerer Linien und dazugehöriger Knoten

Die Form dieser neugenerierten Fläche ist nicht identisch mit der Ausgangsfläche. Die Unterschiede zwischen der neu erzeugten und der Ausgangsgeometrie kann über die Dichte der Hilfskurven gesteuert werden. Je dichter das Kurvennetz und damit das Knotennetz ist, desto genauer wird auch die neugenerierte Flächenform mit der alten übereinstimmen.

Berücksichtigung des Hauptbogens und dessen Einfluss auf Flächenraster

Für eine präzise Rasterbildung bei dem behandelten Projekt reicht der beschriebene Ansatz nicht aus. Einen weiteren Einfluss auf das Raster hat die Lage des Hauptbogens. Durch dessen Anschlusspunkt unten und oben wird das Raster an diese bogenabhängige Abstützungslinie fixiert (Abbildung 5.10).

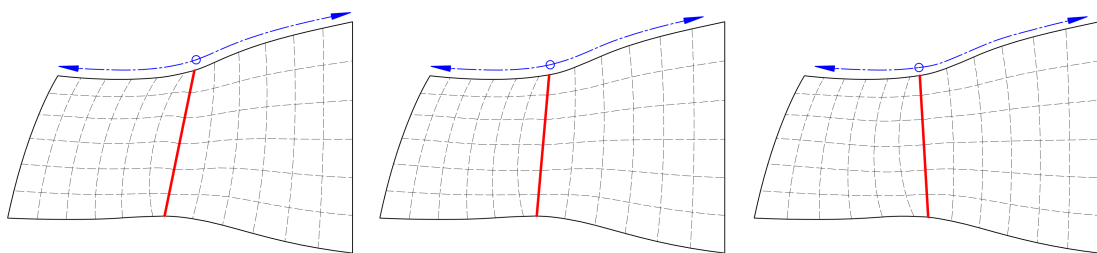


Abbildung 5.10: Erforderliche Bogenabhängigkeit beim U-/V-Flächenraster

Um diese Logik bei der visuellen Programmierung umzusetzen, muss die allgemeine Basisfläche in zwei unabhängige Abschnitte geteilt werden. Die eigentliche Rekonstruktion beginnt mit der Definition der Berandungslinien, welche als Endknoten der Basislinien für eine „Loft-Fläche“ sein sollten (Position Nr.1, die Abbildung 5.12 auf der Seite 92).

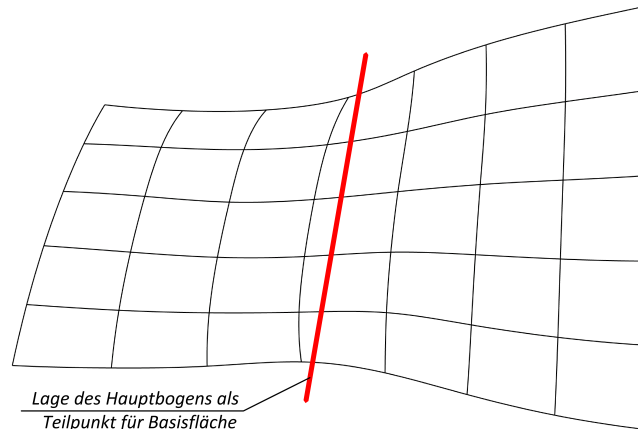


Abbildung 5.11: Berücksichtigung des Hauptbogens bei der Rekonstruktion der Flächentopologie und dessen Einfluss auf das Flächenraster

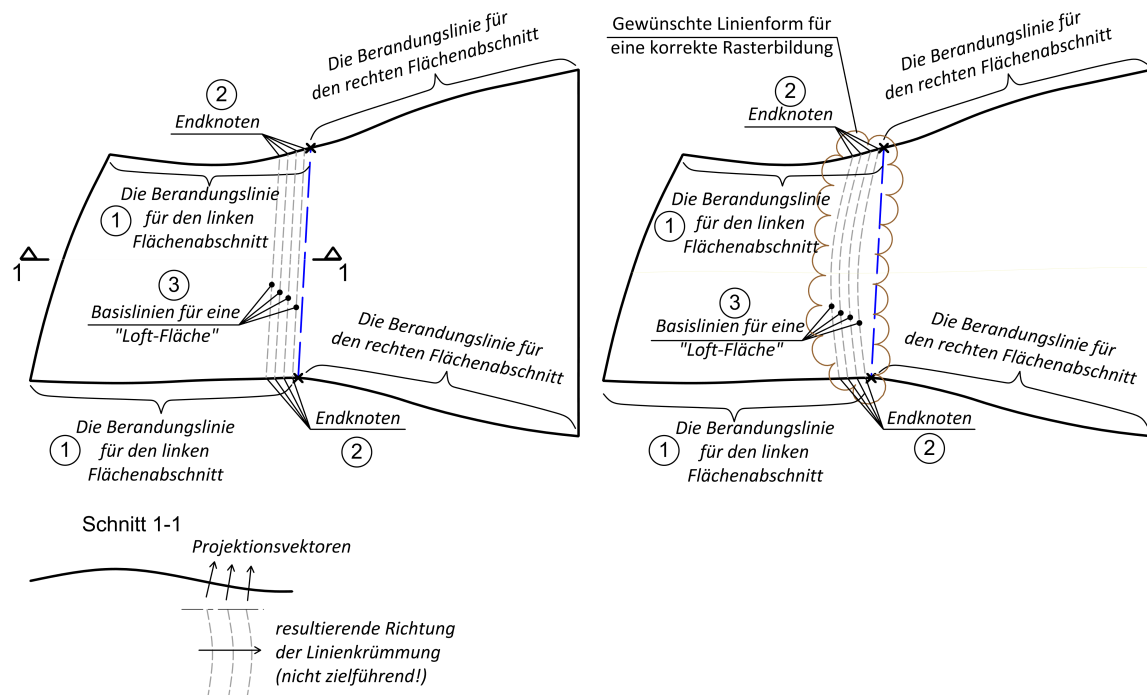


Abbildung 5.12: Die schematisch dargestellte Aktionsreihenfolge bei der Flächenrekonstruktion. Die Basislinien auf der linken Seite würden zu deren ungeeigneter Projektion auf die ursprüngliche Fläche führen (Schnitt 1-1).

Die Endknoten reichen für die gewünschte Linienbildung im Grundriss nicht aus, da weder ihre Projektion auf die Fläche noch ihre Verwendung mit der Komponente „Geodätische Linie“ auf der Fläche eine richtige Ausrichtung bzw. Form liefert. Darüber hinaus wäre der parametrische Ansatz auch eine Kontrollmöglichkeit über das Maß der Abweichung von einer (bogenabhängigen) Geraden (Vergleiche die Abbildung 5.13 auf der Seite 93).

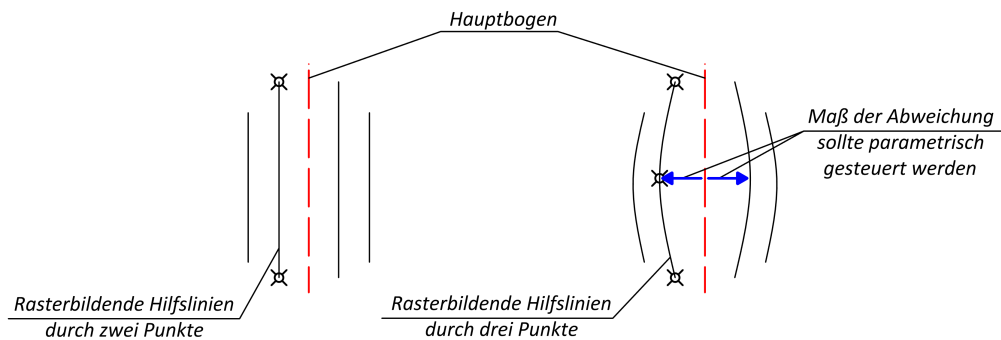


Abbildung 5.13: Abweichung von einer geraden Linienform der rasterbildenden Isokurven wird parametrisch gesteuert

Für die Realisierung wird eine weitere Basislinie in der Flächenmitte gezogen, die eine andere Anzahl von Kontrollknoten durch die reglergesteuerte Nummerierungskomponente bekommt (Abbildung 5.14 auf der Seite 93).

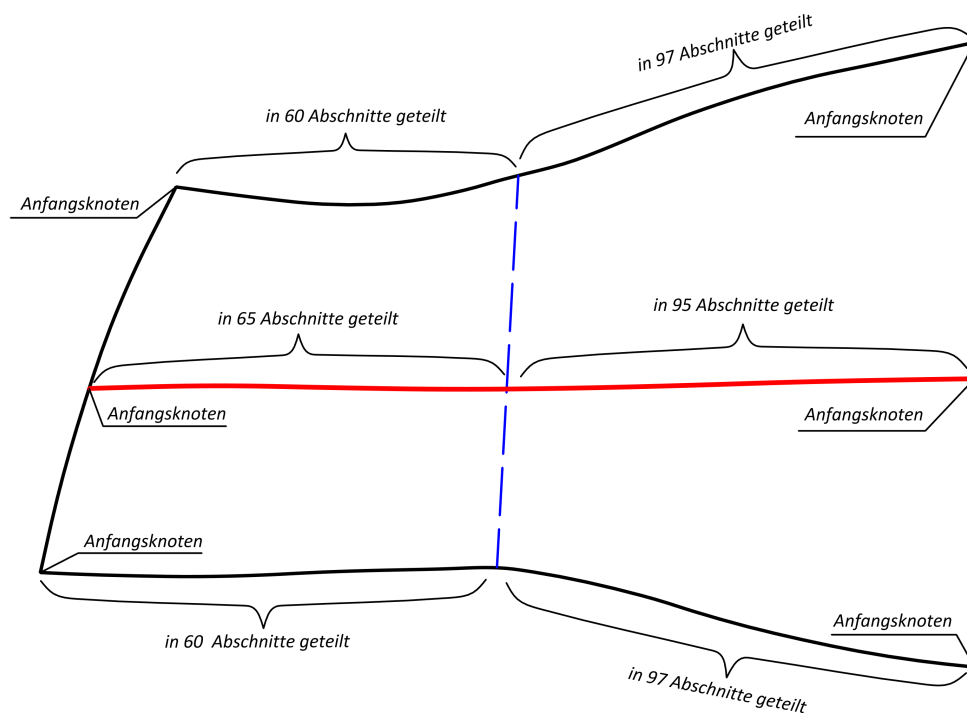


Abbildung 5.14: Dritte Basislinie als Isokurve in der Flächenmitte bekommt kleinere Anzahl an Zwischenknoten

Durch drei Basislinien werden Bogen gezogen, die anschließend auf die Basisfläche projiziert werden (Abbildung 5.15 auf der Seite 94).

Parallel zur Ansteuerung der Knotenanzahl beeinflusst ein weiterer Parameterregler die Anzahl von zu löschenden Hilfslinien an der Bogen-seite. Als letzter Schritt wird auf diese

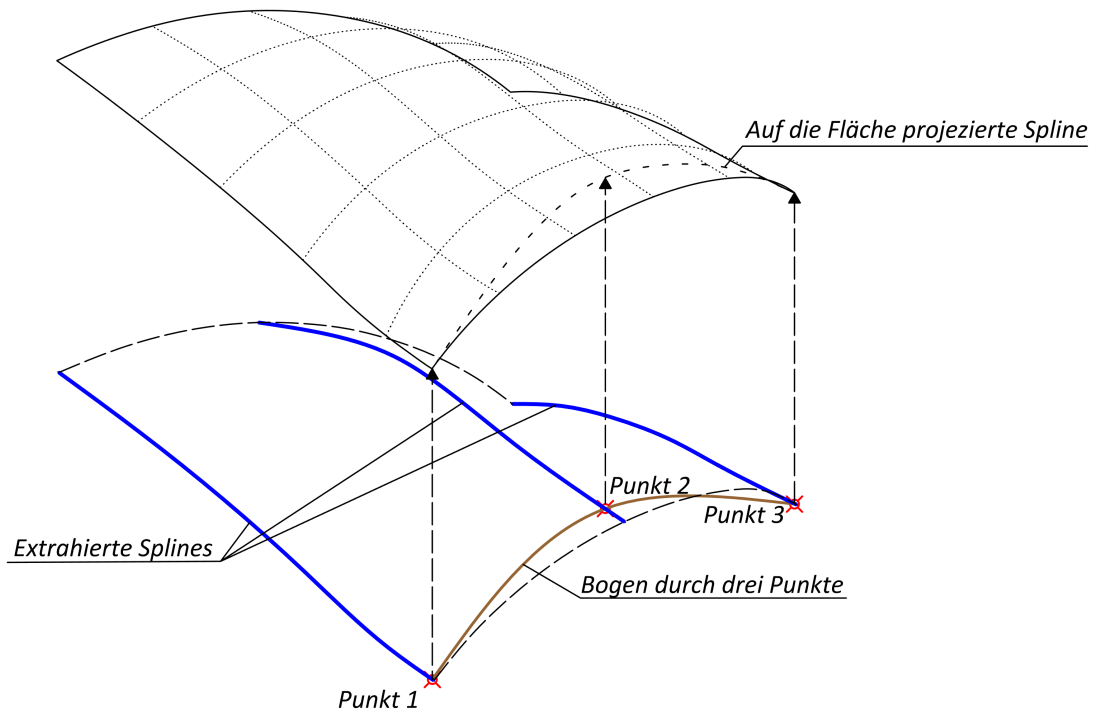


Abbildung 5.15: Zwischenschritte bei der Rekonstruktion der Basisfläche: neu generierte Splines bilden neue Rastergrundlage

projizierten Splines die Loft-Komponente angewandt. Für einen reibungsfreien Durchlauf der Schaltung muss man jedoch die sich in einem Punkt treffenden Bogenlinien entfernen (Abbildung 5.16 auf der Seite 94).

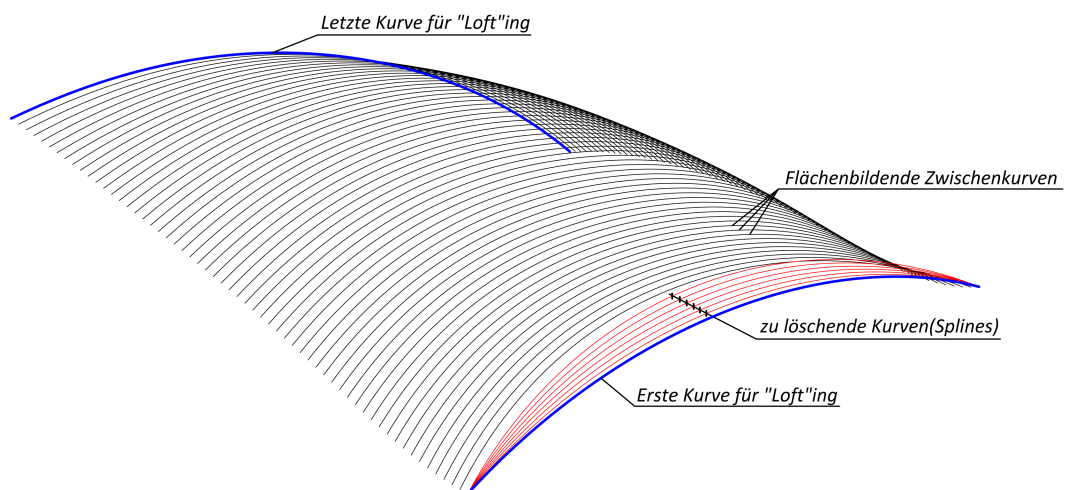


Abbildung 5.16: Vorbereitung der Basiskurven für die zu „loftende“ Fläche

Dies hat eine größere Abweichung der neu erzeugten Fläche von der Ursprungsfläche zur Folge. Diese Abweichungen sind dort am größten, wo keine Erzeugungskurven de-

finiert wurden. Ein Lösungsansatz zur Behebung dieser Abweichung ist die nochmalige Segmentierung des Randes mit der Anzahl der gelöschten Kurven.

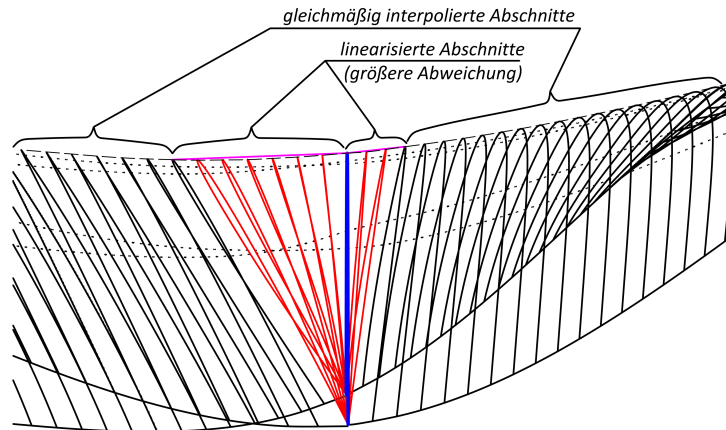


Abbildung 5.17: Linearisierte Flächengeometrie in Bereichen mit den gelöschten „störenden“ Kurven (Bei der Verwendung „Loft“-Komponente)

Hier wird die Bedeutung der Vorbereitung und Analyse von Programmierkonzepten in Hinblick auf die Exaktheit der Ergebnisse deutlich. Die notwendigen Rechenkapazitäten spielen hierbei in der Praxis eine nicht unwesentliche Rolle, da die erzeugte Flächengeometrie Grundlage für alle weiteren Modellierungsschritte ist.

Dabei gibt es auch verschiedene Effekte aus der Anwendung unterschiedlicher Optionen innerhalb der Loft-Komponente. Die gewünschte Flächengeometrie kann bei gleichen Baskurven unterschiedliche Rastervarianten besitzen. Nachteilig ist, dass man oft nur in den späteren Programmierungsphasen negative Folgen der einen oder anderen Option entdecken kann. Besonders bei Neueinsteigern verbirgt sich die Gefahr, in den nächsten Etappen mehrere Iterationen durchzuführen.

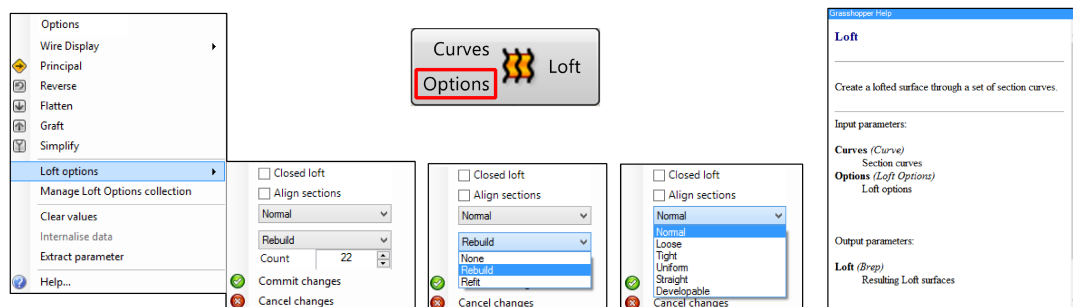


Abbildung 5.18: Unzureichende Dokumentation der Optionauswirkungen in der Standard-Hilfe in Grasshopper3D®

Als ein anschauliches Beispiel kann die Breite des ersten bzw. letzten Rasterstreifens dienen. Diese hängt stark von den ausgewählten Loft-Optionen ab. Abbildung 5.19 a)-c) auf der Seite 96 zeigt, dass man bei unveränderter Kurvenanzahl und Lage unterschiedliche Raster bei nur einer variierenden Option der Loftfläche als Ergebnis bekommen kann.

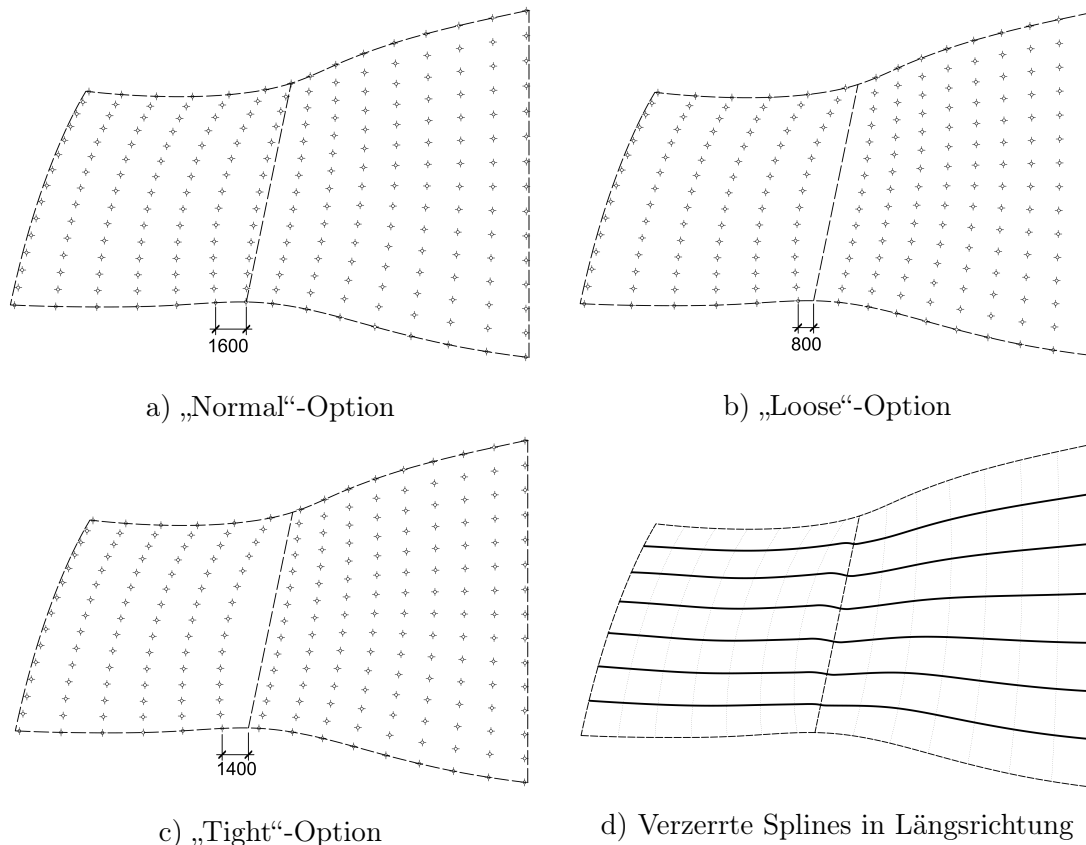


Abbildung 5.19: a)-c) Einfluss drei verschiedener Loft-Optionen auf die Ausbildung des Rasternetzes: a) bei „Normal“-Option b) bei „Loose“-Option c) bei „Tight“-Option

d) Aufteilung der Basisfläche in zwei separate Teile führt zur Verkrümmung der Längsträgerachsen im Stoßbereich

Die Topologielinien durch die Kontrollknoten liegen nach der Anwendung „Divide Surface“-Komponente so, dass man je nach Parameterwert „Anzahl U und V Streifen“ ein gleichmäßig verteiltes Raster der Trägerachsen bekommt.

Dabei entsteht ein zusätzliches Problem an den am Bogen angeschlossenen Rändern (Abbildung 5.19 d) auf der Seite 96). Durch die Verkrümmung der angrenzenden Richtungsvektoren bilden aneinanderfolgende Linien in Längsrichtung eine Art „Welle“. Dieses Problem wird dadurch gelöst, dass man für alle Innenkurven in Längsrichtung einen zusätzlichen Neuaufbau mittels Interpolation und erneutes Projizieren auf linke bzw. rechte Fläche durchführt.

Zerlegung in zwei Skriptengebiete

Als nächster Schritt wird aus der Basisfläche eine zweite Fläche generiert. Während die erste Fläche die oberste Membranschicht repräsentiert, wird diese zweite Fläche als Systemebene der Trägerachsen genutzt.

Zur Vereinfachung der Handhabung und für einen besseren Überblick empfiehlt es sich, das visuelle Skript ab einem gewissen Reifegrad des entworfenen Algorithmus in separaten Grasshopper3D® Dateien abzulegen. Eine weitere Option wäre dann ein sogenannter „Cluster“ in Grasshopper3D® zur Archivierung einzelner Skriptteile.

Eine mögliche Datenstruktur ist in Abbildung 5.20 gezeigt:

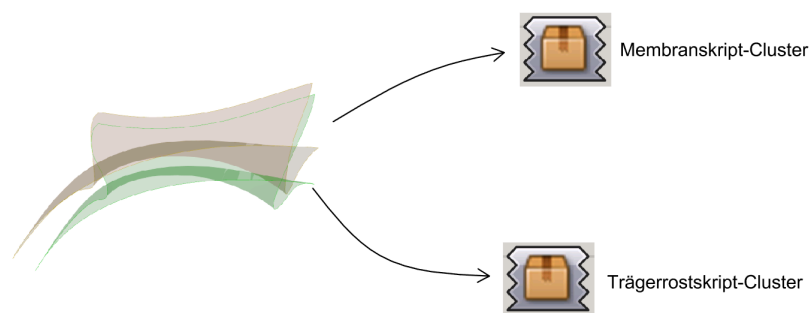


Abbildung 5.20: Zusammenfassung der Skriptingbereiche für bessere Überschaubarkeit

„Cluster“ können eigene Inputs und Outputs beinhalten, sodass ihre Ergebnisse bei Bedarf problemlos zusammengeführt werden können. Zum Beispiel im Fall der Generation von Abstandhaltern für Membrananhebung findet diese Möglichkeit ihren Einsatz. Eine weitere Einsatzmöglichkeit von Clustern ist die Vorbereitung, Strukturierung und Integration von Materialien und Querschnitten einzelner Strukturbestandteile für die Übergabe an das Finite Elementprogramm RFEM.

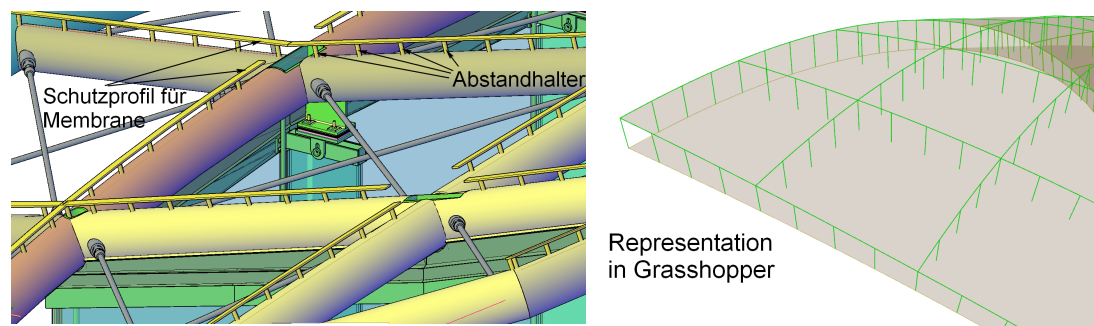


Abbildung 5.21: Vergleich des Referenzmodells mit dem Grasshopperskript: die Ebenen für membranhaltende Profile und für Träger stellen zwei verschiedene Arbeitsebenen dar, die für die Abstandhalterdefinition aneinander geknüpft werden müssen.

Flächen

Als erste Aufgabe steht beim visuellen Skripting die Berechnungsvorbereitung im Fokus. Deswegen muss zuerst die Rasteraufteilung für den korrekten Modellexport bezüglich der Schnittstellenmöglichkeiten in RFEM beachtet werden.

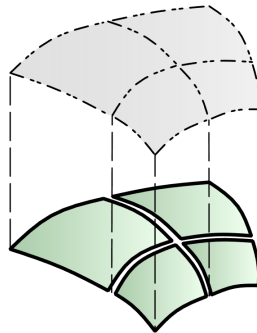


Abbildung 5.22: Zerlegung der ganzen Membranform in die einzelnen Rechteckflächen

Hierfür wird die Membranfläche nicht als eine einzige randbegrenzte räumliche Fläche übertragen, sondern als mehrere mit Trägerrostraster übereinstimmende Rechteckflächen (Abbildung 5.22 auf der Seite 98).

Für einen korrekten Wiederaufbau jeder Membranfläche muss die im Grunde liegende Berandung auch linearisiert oder diskretisiert sein (Abbildung 5.23 auf der Seite 98).

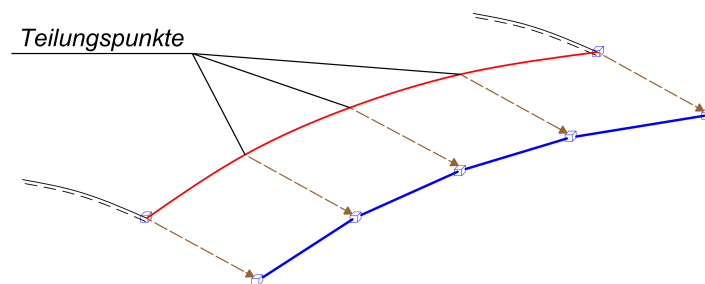


Abbildung 5.23: Kurvensegmentierung - Splinesegmente in Linien aus zwei Knoten

Ausgehend von dem gewählten Rastermaß (ungefähr zwei Meter) wird die für die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse notwendige diskretisierte Stablänge etwa 0,5 m betragen. Da diese Länge wegen der Unregelmäßigkeit der Struktur nicht präzise eingehalten werden kann, wird eine Aufteilung in vier Segmente mit je einem Flächenrand programmiert (Abbildung 5.25 auf der Seite 99).

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Übertragung einer geometrisch exakten Form der Flächen aus dem geskripteten Grasshopper-Rhino-Modell nach RFEM. Die einfachste Möglichkeit eine räumlich gekrümmte Fläche in RFEM zu erstellen, ist die Benutzung der sogenannten Quadrangel-Flächen (Abbildung 5.25 auf der Seite 99). Diese sind vom

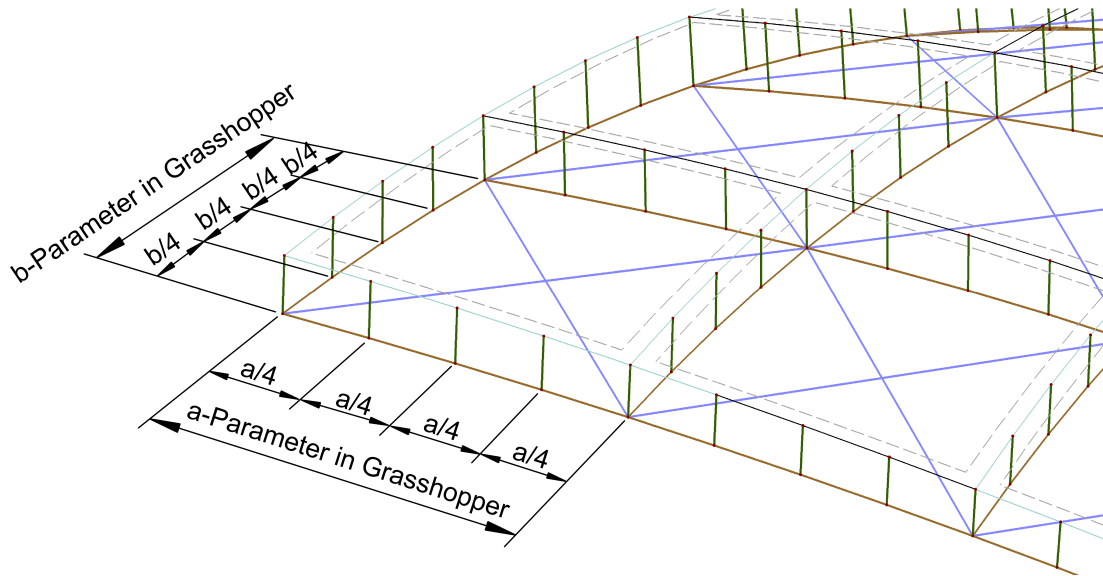


Abbildung 5.24: Segmentierung der Membranbegrenzungslinien und Trägerachsen

Aussehen sehr ähnlich zu NURBS-Flächen. Ihre Geometrie weicht hinsichtlich der mathematischen Beschreibung ab, da sie auf Randlinien und Eckknoten basiert und nicht wie bei Nurbsflächen auf Kontrollknoten.



4 Modelldaten

4

Quadrangelfläche



Dieser Flächentyp stellt eine allgemeine vierseitige Fläche dar. Als Begrenzungslinien sind neben geraden Linien auch Bögen, Polylinien oder Splines möglich. Mit diesem Flächentyp lassen sich Schalen modellieren, denn die Begrenzungslinien müssen nicht in einer Ebene liegen.

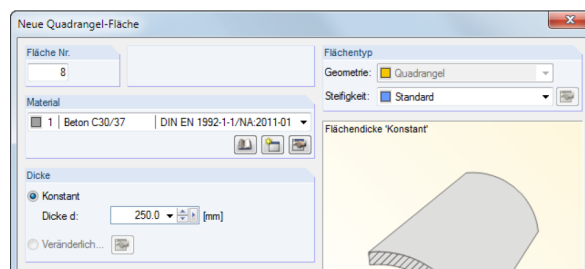


Abbildung 5.25: Quadrangel-Flächentyp als Referenztyp im FE-Programm

Flächenteilung

Begonnen wird mit der Definition des notwendigen Parametrisierungsgrades der zu erzeugenden Flächen. Als variabel wird die Anzahl der Träger je einer Tragwerksrichtung angenommen, z.B. in Längsrichtung oder Querrichtung. Das sind die Parameter „a“ und „b“ auf der Abbildung 5.24, Seite 99.

Grundsätzlich sind mehrere Lösungswege möglich. So können für die Extraktion von

Kurven aus einer Fläche zwei Methoden Verwendung finden:

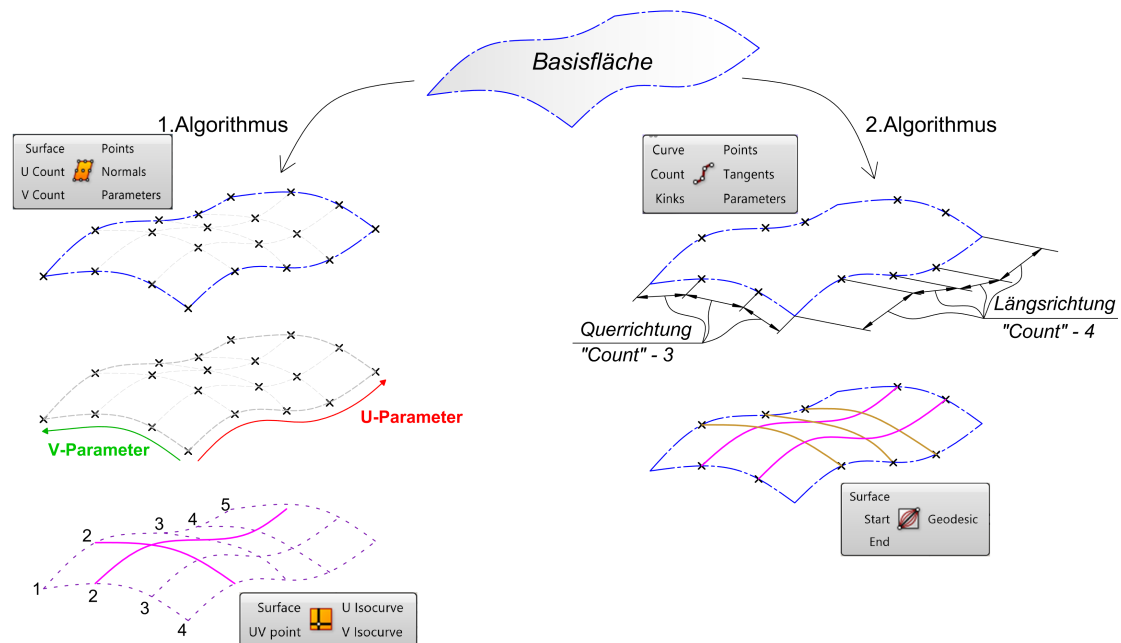


Abbildung 5.26: Extraktion einzelner Kurven aus der Flächenebene durch die Verwendung verschiedener Vorgehensweisen

Dadurch erreicht man aber nicht dasselbe Ergebnis. Die Geodesik-Komponente bildet die sogenannte geodätische Linie, basierend auf zwei Punkten an gegenüberliegenden Rändern (Start- und Endpunkt). Diese geodätische Linie stellt den kürzesten Weg auf der Fläche zwischen den zwei Punkten dar. Die Funktionsweise der Isocurve-Komponente basiert ihrerseits auf dem zuvor vorbestimmten Raster. Das Raster wird durch die vorher erwähnte Loft-Komponente beeinflusst. Somit erhält man mehr Flexibilität bei der Einstellung der gewünschten Trägerverteilung, als bei der Geodesik-Komponente (Abbildung 5.26 auf der Seite 100).

Für das Projektbeispiel wurde der erste Algorithmus wie in Abbildung 5.26 dargestellt. Dabei verwendet man die „DivideSurface“-Komponente mit sogenannter Slider-Ansteuerung (Regler mit voreingestelltem Wertebereich), um die Anzahl der in U- und V-Richtung extrahierten Kurven einzustellen. Diese Kurven werden später als teilende Elemente dienen.

Für ein systematisches Vorgehen ist eine schrittweise Behandlung der Flächen wichtig. Die zu bearbeitende Fläche wird zuerst in Streifen quer zu ihrer Längsrichtung geteilt, anschließend mit den senkrechten Kurven in einfachste parallelogrammähnliche Elemente geteilt (Abbildung 5.27 auf der Seite 101).

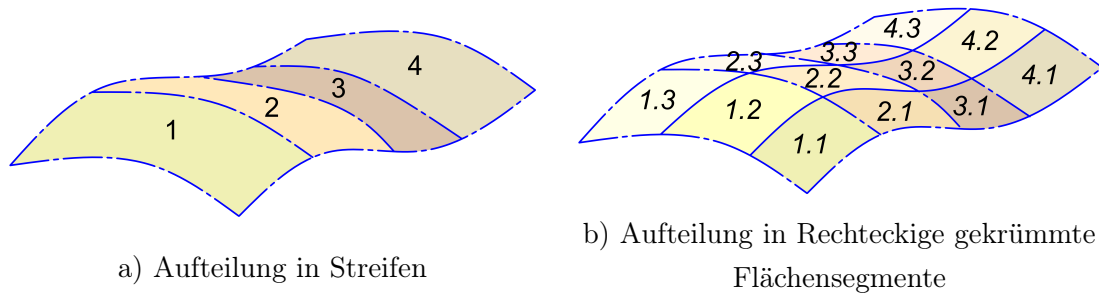


Abbildung 5.27: Schematische Darstellung der Skriptenarbeit

Trägerrost

Alle Achsen der Träger müssen in einer gemeinsamen Arbeitsfläche liegen, die aufgrund der Membrangeometrie auch räumlich gekrümmt sein muss. Diese Arbeitsebene erhält man im visuellen Skript durch die Verwendung der offset-Komponente. Diese Komponente berücksichtigt lokale Achsensysteme in allen Punkten der Basisfläche und erzeugt dadurch eine Kopie mit exakt übernommenen Achsensystemen je Knoten.

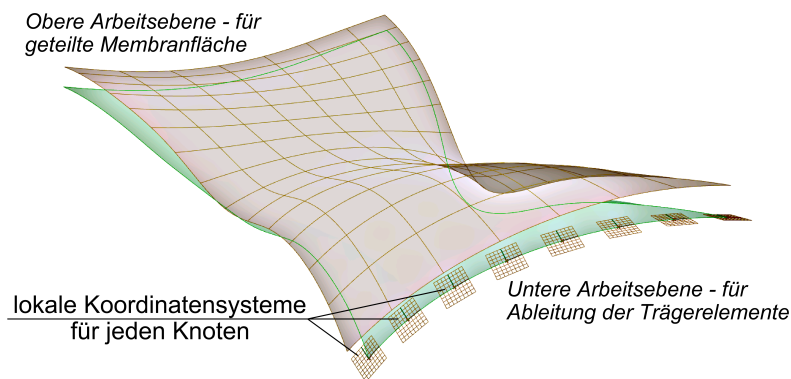


Abbildung 5.28: Lokale Achsensysteme für Abstandhaltererzeugung

Ähnlich zu dem erläuterten Verfahren bei den Flächen wird diese Flächenableitung in rasterbildende Kurven geteilt. Aus den generierten Listen mit Kurven werden anschließend Duplikate gelöscht. Diese nun zur Verfügung stehenden Kurven werden durch ihre Überlappung mit sich selber in einzelne nicht ebene Abschnitte geteilt.

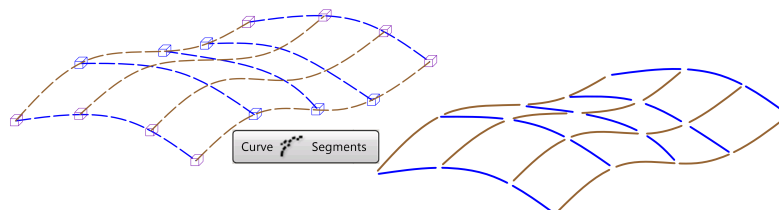


Abbildung 5.29: Erste Kurvensegmentierung - in feinere Splines

Diese Abschnitte haben zwar Splinegeometrie, müssen aber sowohl für die Übertragung in ein Berechnungsprogramm, als auch für die Generation von Abstandhaltern in feinere Segmente diskretisiert werden (mit der Segmentenanzahl nach Abbildung 5.24, S.99). Die Länge jedes Elements ist variabel und leitet sich aus den vordefinierten Anforderungen der Tragwerksberechnung ab. Diese Diskretisierung erzeugt Linien mit einer Länge etwa 0,5m (bei einer durchschnittlichen Streifenbreite etwa 2m).

Kreuzaussteifungen

Weitere wesentliche zum Trägerrost gehörende Bauteile sind die kreuzförmig angeordneten Aussteifungsverbände, die ebenfalls im visuellen Skript modelliert werden. Als Hilfswerkzeug zur Reduktion des Programmierungsaufwands können zwei Komponenten aus dem Grasshopper-Addon Lunchbox genutzt werden: „Braced Grid 1-D Structure“ und „2D Truss“. Die erste Komponente ermöglicht eine direkte Generierung der Diagonalelemente aus der oben beschriebenen offset-Fläche und U-/V-Werten, die als einstellbare Parameter aus dem Skriptanfang übernommen werden. Mit dieser Komponente werden die Diagonalen in eine Richtung erstellt.

Für die gegenseitig verlaufenden Diagonalen bietet die Komponente „2D Truss“ eine einfache Lösung. Anhand vorher in Längsrichtung extrahierter Kurven werden die Gurte eines imaginären Fachwerkträgers repräsentiert. Die „2D Truss“-Komponente generiert dazwischen fehlende Diagonalen in umgekehrte Richtung.

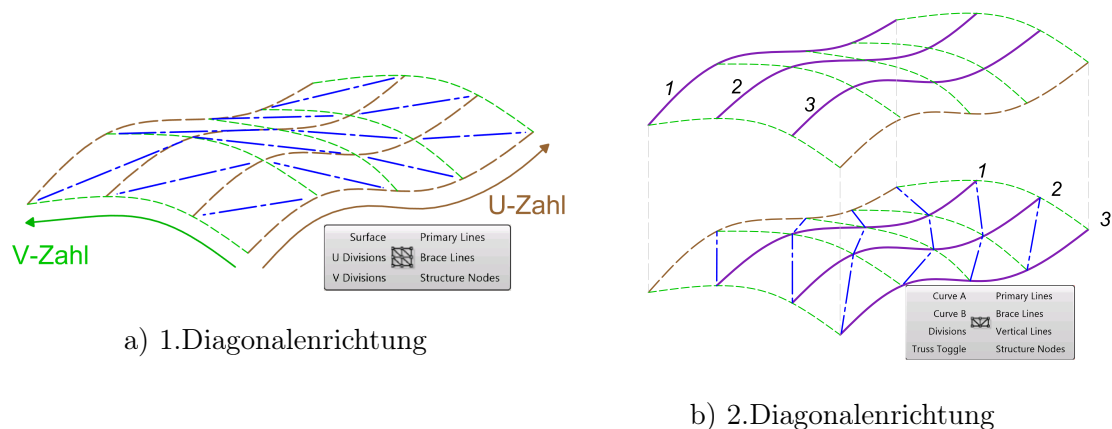


Abbildung 5.30: Ein Beispiel für die Generierung der Aussteifungsverbände:

- a) 1. Diagonalenrichtung - mit „Braced Grid 1-D Structure“-Komponente abgehandelt,
- b) 2. Diagonalenrichtung - mit „2D Truss“-Komponente abgehandelt

Da es sich im Projektbeispiel um eine in zwei Abschnitte geteilte Fläche handelt, liefern die vorgestellten Komponenten keine akzeptablen Ergebnisse. Für den vorhandenen Fall werden Kurven aus Trägerrostachsen übernommen und als Linienpaare für Diago-

nalenbildung eingesetzt (Abbildung 5.31). Außer dem Mehraufwand bei der Verfolgung der korrekten Reihenfolge der Kurvensegmente in Listen, muss auch die Kontrolle auf Doppelemente der gleichen Geometrie und Kontrolle der Richtungseinheitlichkeit bei allen Kurven durchgeführt werden. Deswegen sieht das Skript zwar nicht besonders groß aus, verbirgt aber mehrere wichtige Vorbedingungen in sich. Das richtige Datenmanagement spielt bei der visuellen Programmierung eine entscheidende Rolle und erleichtert die Lösungssuche drastisch .

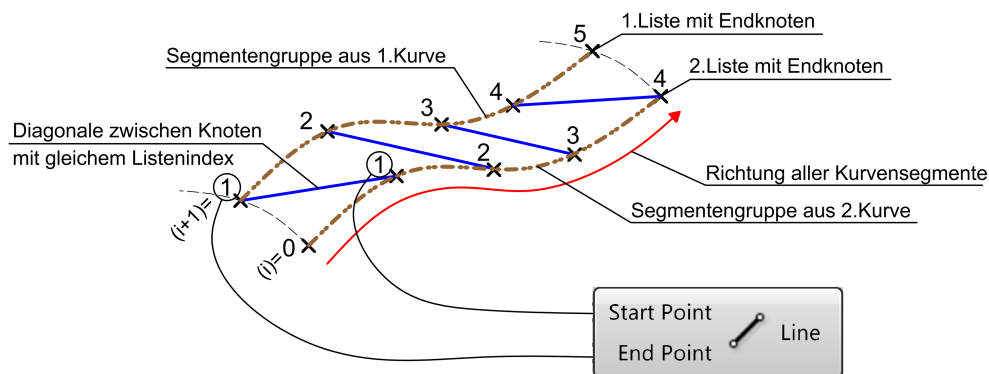


Abbildung 5.31: Algorithmusbeschreibung für die Generierung der Aussteifverbände mit weichen Druckstäben

Vergleicht man das durch visuelle Programmierung erstellte Modell mit dem Referenzmodell, erkennt man eine Abweichung im zu den Hauptbogenstützen angrenzenden Bereich (an den zu den Hauptbogenstützen verlaufenden Diagonalen). In diesem Randbereich liegen die Diagonalen teilweise nicht mehr in der Arbeitsebene, d.h. nicht in der gleichen Ebene wie die Bezugsfläche (Abbildung 5.32). Ein weiterer Sonderfall betrifft solche Ras-

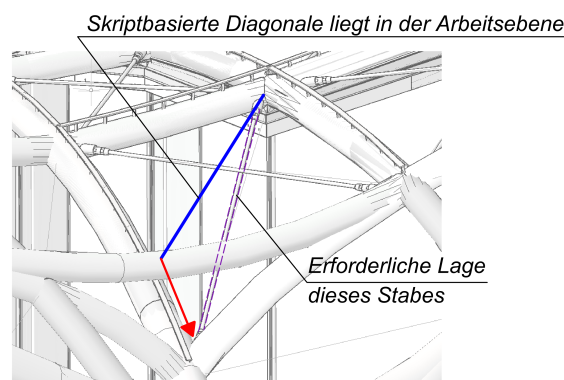


Abbildung 5.32: Sonderfall bei der Bildung von Aussteifungsverbänden

terzellen, wo Diagonalen nach Referenzlösung nur in einer von zwei Richtungen erstellt werden. Diese individuellen Stellen fordern eine zusätzliche Ausarbeitung, worauf aus Zeitgründen verzichtet wurde.

Unterstützungsbereiche

Dieser Teil des Skriptes ist am aufwändigsten und mit vielen Problemstellen verbunden. Die vom Architekt vorgegebene Variante geht davon aus, dass Übergangsbereiche zwischen Membrane und Tragstruktur maximal gleichmäßig überbrückt sein sollten. Dies führt zu den in die Membranfläche „fließenden“ Stützen und unter anderem zu einem besonderen Träger in Querrichtung, der nicht vollständig in der Tragsystemebene untergebracht wird. Das heißt, der Träger „fließt“ auch aus dieser Ebene nach unten zu den zwei am Rand liegenden Stützpunkten (Abbildungen 5.33 und 5.34).

Das Problem besteht darin, dass der Trägerbogen zwar in die Arbeitsebene eingebunden sein muss, und folglich als Berandungslinie für Membranflächen dienen sollte, aber gleichzeitig am Rand nach unten abweicht. So entsteht eine Fehlstelle für die Membranfläche am Rand. Da lediglich eine Hälfte des Tragwerks aus symmetriegründen modelliert wird, können Skriptanteile als Zusammensetzung dargestellt werden:

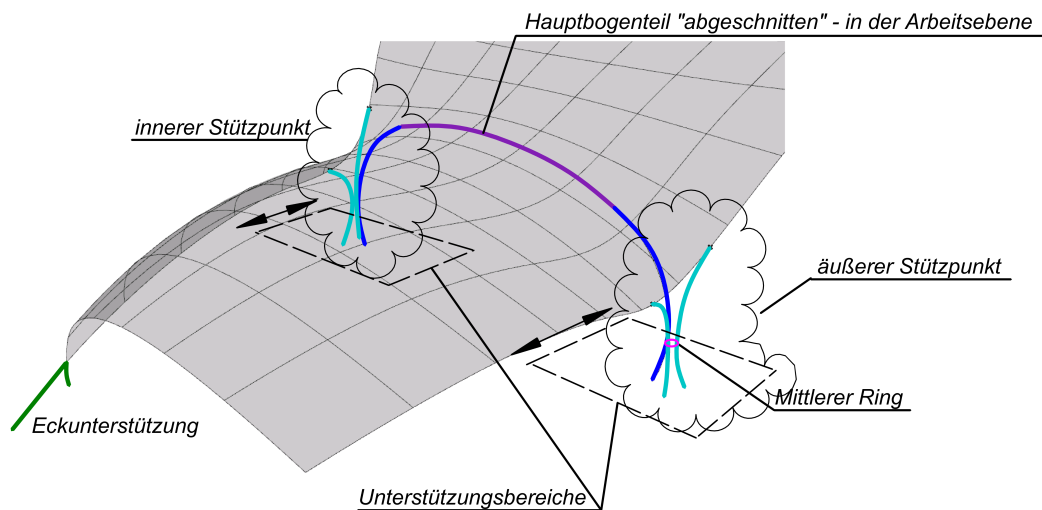


Abbildung 5.33: Unterstützungsbereiche - Überblick über Bestandteile entsprechend Skript in Grasshopper3D®

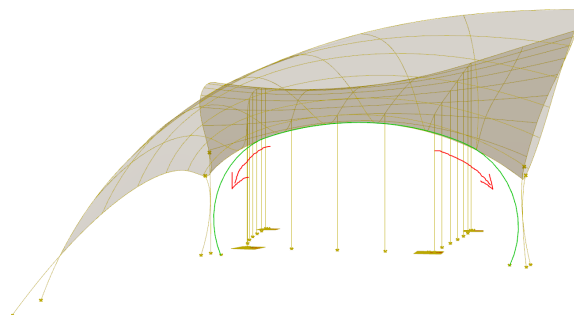


Abbildung 5.34: Hauptbogen unter der Arbeitsebene für Trägerrost

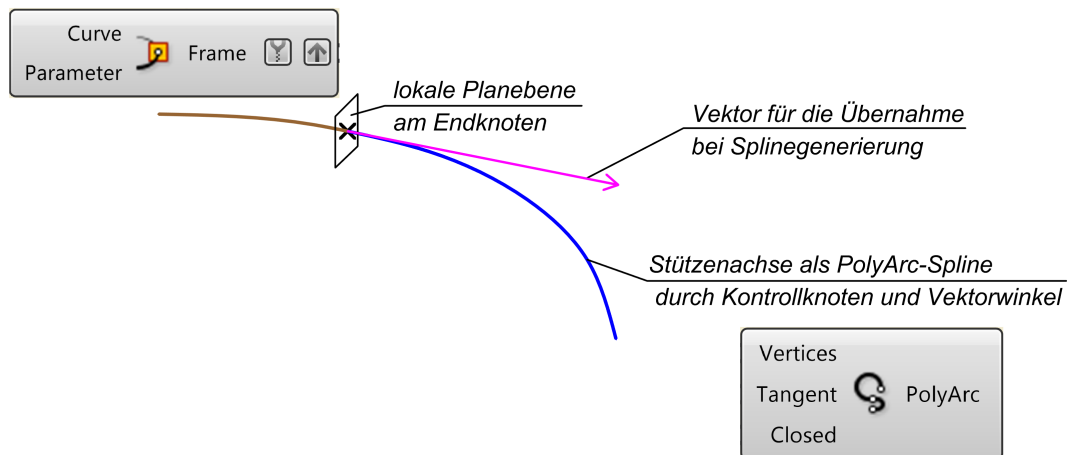


Abbildung 5.35: Die korrekte Übernahme des Richtungsvektors an der Anschlussstelle des Hauptbogens zu der Stütze

Glaswände

Glaswände werden beim realen Projekt von einer anderen Firma geplant. Da sie aus tragwerksplanerischer Sicht mit der ganzen Überdachungsstruktur zusammen betrachtet werden müssen, wird ein Teil davon in die Berechnung und auch in das Skript miteinbezogen.

Die Seilelemente, die für die Vermeidung großer Verformungen der Hauptstruktur vorgespannt werden, sind im Skript als einfache vertikale Linien an den Stellen der Rasterknoten dargestellt. Ihre Lage im Grundriss wird von Hand, durch multidimensionale Slider angesteuert, mit vier Punkten bestimmt (Abbildung 5.36).

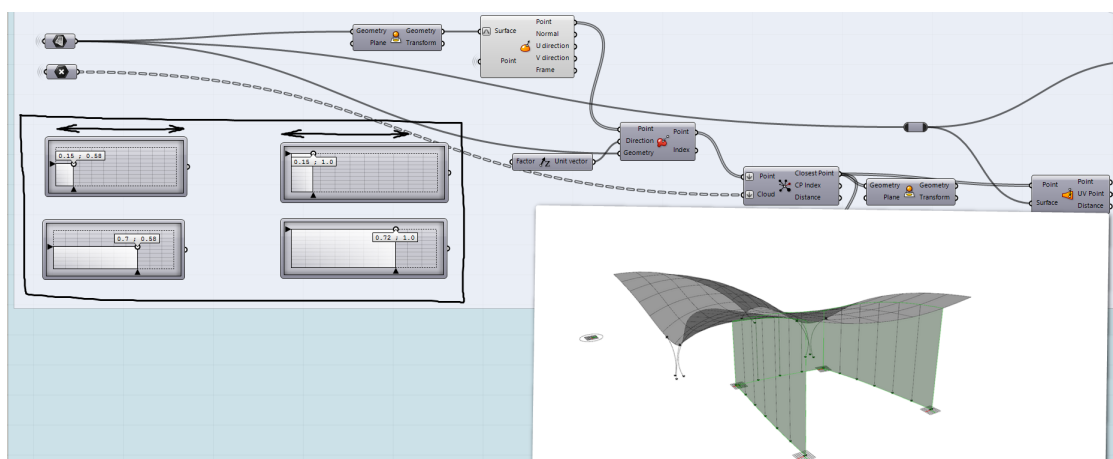


Abbildung 5.36: Glaswände - Definition in Grasshopper3D[®] mit Vorschau

5.3 Anbindung an FE-Analysis-Software Dlubal RFEM5 durch RF-COM Schnittstelle

Vorbereitung zur RFEM-Übergabe

Wie es im Abschnitt 3.3.2 erläutert wurde, ist für den Export nach RFEM der externe Addon RhFEM in Grasshopper3D[®] zuständig. Für dessen korrektes Funktionieren müssen einige Bedingungen erfüllt sein:

- bei allen Kurven muss man entweder vor dem Input eine Diskretisierung in einfache aus zwei Endknoten bestehende Linien durchführen, oder im Input-feld Maximale Segmentlength einen numerischen Wert eingeben, der die maximale Segmentlänge definiert (standardmäßig werden alle Splines automatisch in Segmente mit einer maximalen Länge von einem Meter umgewandelt - Abbildung 5.37).

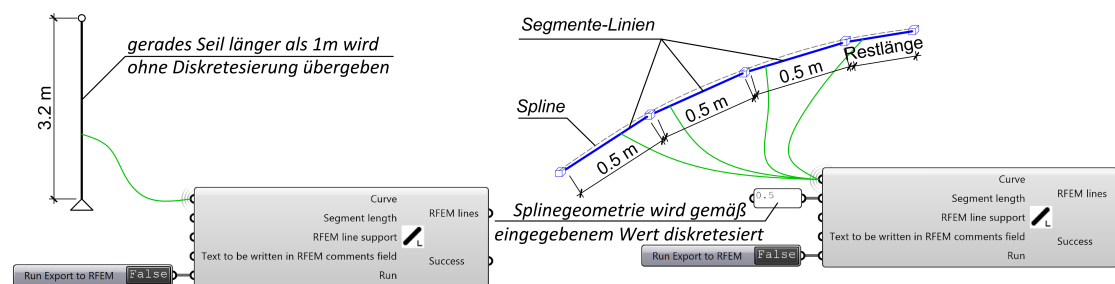


Abbildung 5.37: Segmentierung - mögliche Varianten

- bei der Benutzung nutzerabhängiger in RFEM nicht enthaltener Querschnitte muss der entsprechende Eintrag im RFEM-Querschnittskatalog erstellt werden (bei dessen Abwesenheit werden Linien übertragen, aber kein Querschnitt zugewiesen). So kann zum Beispiel der für die Abstandhalter verwendete Stabquerschnitt „Exzenter“ mit eigenen Steifigkeitswerten automatisch korrekt übernommen werden (Abbildung 5.38 auf der Seite 107);
- für die Generierung eines starren Stabes muss das Member Section Input den Wert „-1“ beinhalten (Abbildung 5.39 auf der Seite 107);
- Gelenke werden durch die NodalSupport-Komponente modelliert. Unter anderem ist es möglich bei Gelenkdefinition ihre Federsteifigkeit und Drehsteifigkeit individuell einzustellen (Abbildung 5.40 auf der Seite 107).

Für die Flächenübergabe in unserem Beispielprojekt dürfen keine Berandungslinien übergeben werden. Die zu Grunde gelegten Linien werden automatisch gemäß dem geänderten C#-Skript erstellt und im RFEM-Modell platziert (Abbildung 5.41 auf der Seite 108).

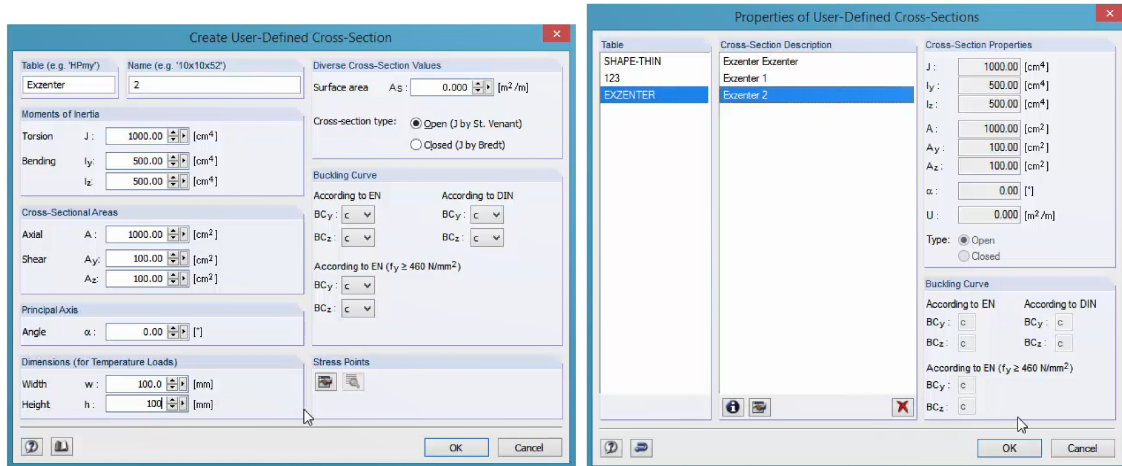


Abbildung 5.38: Eigener nutzerdefinierter Eintrag im RFEM-Querschnittskatalog

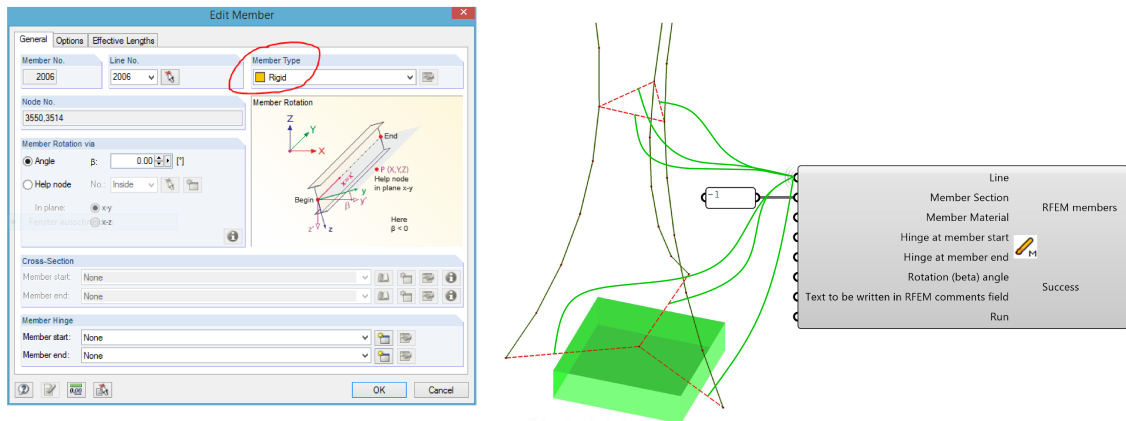


Abbildung 5.39: Definition der Starrstäbe in der Memberkomponente

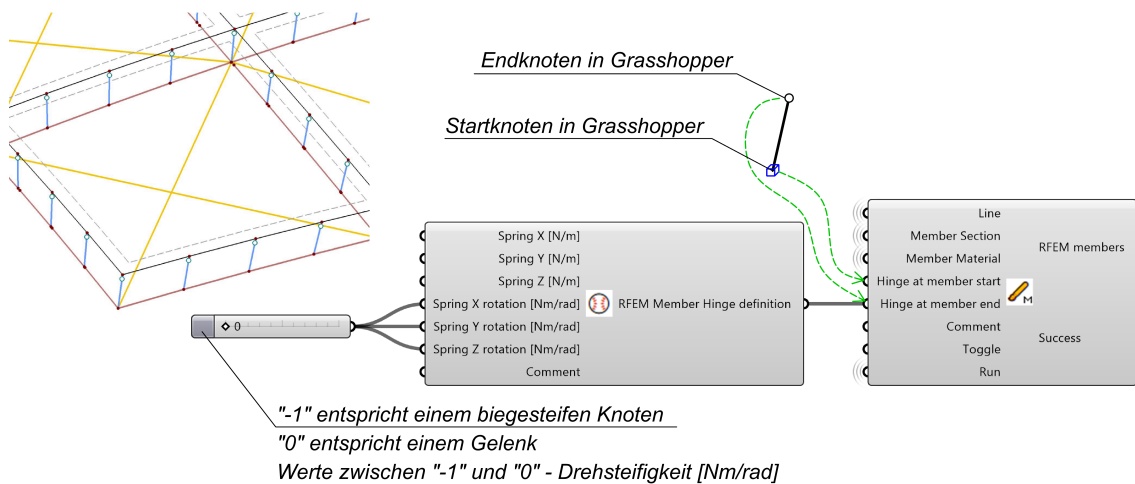


Abbildung 5.40: Gelenkdefinition bzw. Federsteifigkeit

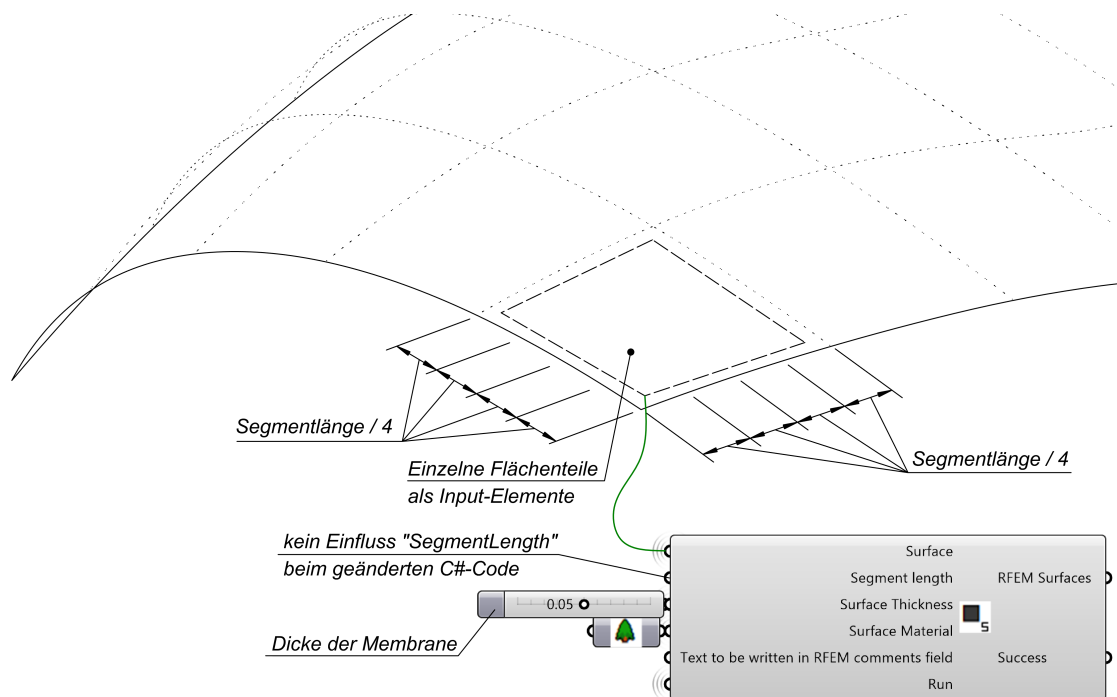


Abbildung 5.41: Flächenexport nach RFEM

Übergabe nach RFEM

- Der Flächenexport wird nach der erfolgreichen Linien-Übergabe gestartet
Dabei müssen bestimmte Aspekte mitbeachtet werden:
 - Die zu übergebenden Linien und Stäbe müssen nach Listengruppen gegliedert und mit Profilquerschnitten versehen sein (Filtermöglichkeit in RFEM).
 - Es ist eine lückenlose Liste mit Elementen erforderlich, um später die Zuordnung in umgekehrter Richtung ausführen zu können.
- Linien mit Stabzuweisung, Gelenkzuweisung und Materialzuweisung werden zusammen nach RFEM exportiert
- Lagerungsbedingungen werden als letztes Glied in der Exportkette übertragen.

Berechnung in RFEM

- Die Belastung wird zurzeit manuell eingegeben
- Das Problem mit doppelten Linien in der Membranebene hat keinen Einfluss auf die Berechnung selbst:
 - Die doppelten Linien dürfen nicht gelöscht werden, sonst entstehen Lücken in den Listen mit Linien (folglich nicht korrekte Zuordnung zur alten Geometrie)

Ablesung der textuell gespeicherten Informationen in Grasshopper3D®

Schritt 1

Anwendung einer eigenen Modifikation des Grasshopper-Addons „RhFEM“ für die Ableseung der Querschnitte und ihrer Stabzuordnung aus RFEM direkt in dem Grasshopper-Arbeitsbereich.

Schritt 2

Zuordnung neuer semantischen Daten aus der Berechnungssoftware RFEM zu der alten Topologie aus dem früher erstellten Skript.

Export aus RFEM

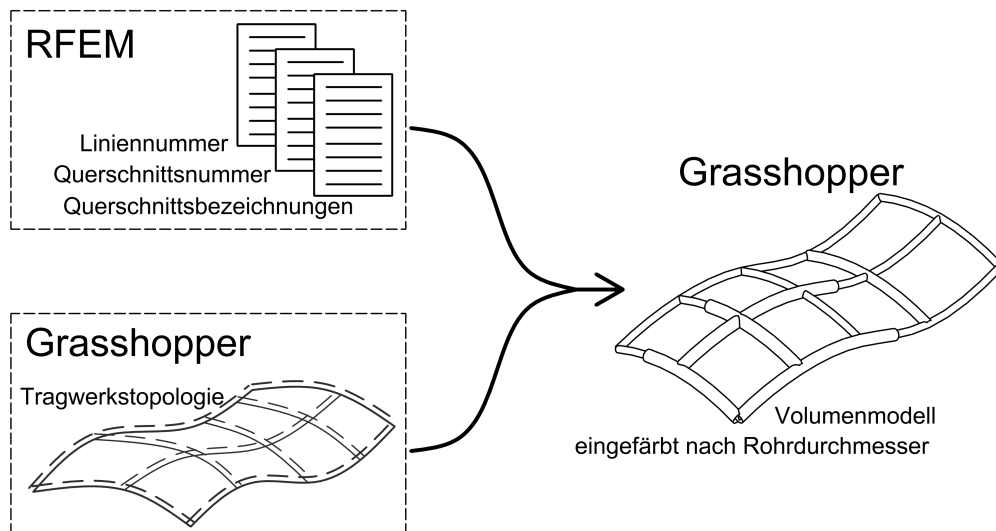


Abbildung 5.42: Rückkopplung ursprünglicher Topologie an die geänderten Querschnitte

1. Eigener C#-Code für Querschnittsübernahme aus RFEM-internen Tabellen.
2. Festhaltung des Informationsflusses aus der RFEM-Datei in TXT-Dateien, um ihre spätere Änderung aus Versehen zu vermeiden. Dadurch wird die Unabhängigkeit von dem zurzeit geöffneten RFEM-Projekt garantiert.
3. Zuordnung neuer Querschnitte zu den ursprünglichen Stabachsen.
 - Dekonstruktion der Querschnittslisten bis zu den einzelnen Durchmesserzahlen. Sortierung und Zuweisung der Geometrie zu den Durchmesserwerten.
 - Optional - Farbdarstellung der zugewiesenen Rohrquerschnitte.

5.4 Anbindung an BIM-Programm

Dieser Abschnitt handelt von den Details für die Vorbereitung nach der FE-Analyse angepassten Topologie in Grasshopper3D® für den Export nach CAD oder BIM-Software (sowie CNC-Fertigung oder Werkstattplanung).

Allgemeiner Überblick über die beschriebenen Einzelschritte:

Schritt 1

Vorbereitung der Übergabe nach Revit® bzw. Allplan®

Schritt 2

Mehrstufiger Importprozess in BIM-Software.

5.4.1 Detaillierter Workflow vom Berechnungsergebnis bis zum BIM-Programm „Revit®“

Vorbereitung zum Export aus Grasshopper3D® nach Revit und Export selbst

- Rückkopplung zweipunktiger Linien zu ursprünglichen Splines

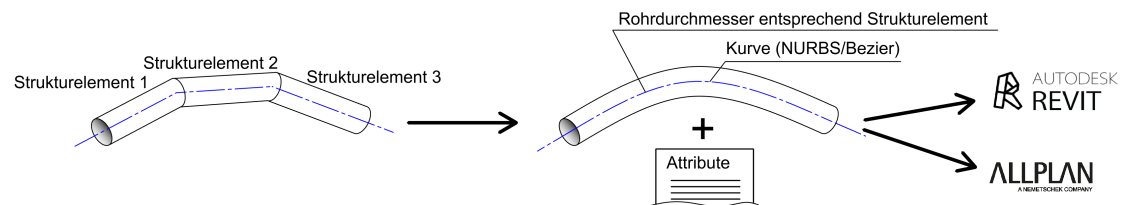


Abbildung 5.43: Rückkopplung Strukturelemente an die exakt beschriebenen Kurven

- IFC-Datei aus Grasshopper3D® durch Geometry Gym® generieren lassen
- Interne Familiengenerierung für Linienenelemente in Grasshopper3D® durch Geometry Gym® Addon (IFC-basierte Übergabe).
- Adaptive Familien für Flächen in Revit® erstellen und in die .RVT-Datei hochladen.
- Für die Familienerzeugung relevante Punkte aus den Flächensegmenten extrahieren und an Addon Grevit anschließen (9 Punkte je Fläche).

Wie es im Abschnitt 3.3.4 erläutert wurde, kann das IFC-Format in Geometry Gym® nur planare Kurven übergeben. Dies hat die Einführung zusätzlicher Skriptanteile zur Überführung aller oder nicht in einer Ebene gekrümmter Splines in Bogensegmente zur

Folge. Die Bögen können ausschließlich planar sein. Die Endform des Tragwerks stellt in dem Fall eine Annäherung zu der exakten Form dar.

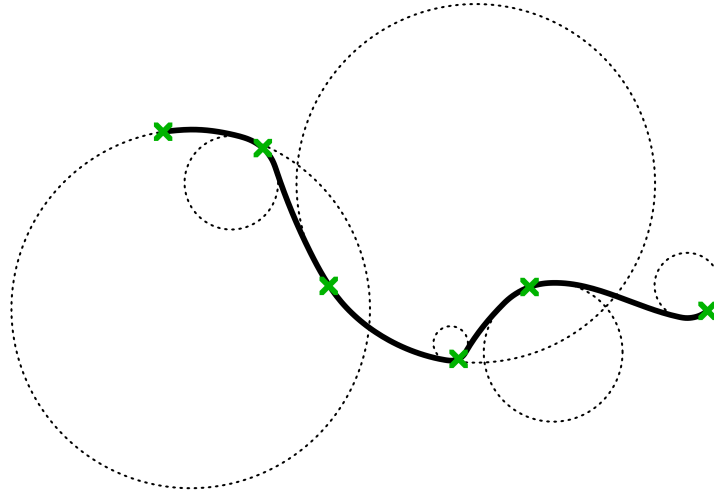


Abbildung 5.44: Überführung gekrümmter Splines in Bogensegmente

Der Ausweichungsgrad kann gemessen werden, um Toleranzbereiche nicht zu überschreiten. Dafür wird nicht die Standard-Komponente verwendet, sondern ein einfacher Python-Skript. Semantische Informationen kommen aus den früher ausgearbeiteten Etappen und brauchen lediglich ein vernünftiges Datenmanagement. Solche geometrische Daten, die in früheren Phasen nicht berücksichtigt wurden, wie zum Beispiel membranhaltende Profile, die als unmittelbare Auflager für Membrane dienen, können hier zusätzlich zu den anderen Elementen hinzugefügt werden.

Die Aufbereitung der IFC-konformen Daten schließt in sich auch die Strukturkomponente „IFCBuilding“ und die projektgenerierende Komponente „ggIFC Project“ ein. Vor dem Export nach IFC empfiehlt es sich, eine nochmalige Prüfung der internen Optionen bei Komponente „ggIFC BaketoFile“ durchzuführen, welche IFC-Spezifikation und andere Formate definieren.

Import Stabgeometrie und Flächengeometrie in Revit®

- Die von Geometry Gym® erzeugte IFC-Datei aus Grasshopper3D® in Revit durch Geometry Gym-Importer importieren. Einstellungen für Rohrverschneidungen beachten.
- Grevit in beiden Programmen starten und Familien generieren lassen.

Beim IFC-Import werden spezifische Werkzeuge wie Geometry Gym® benutzt (Abbildung 5.45). Die Standardangebotene Import von Revit® bzw. das Öffnen der IFC-Dateien liefert an der Stelle gar keine Ergebnisse.

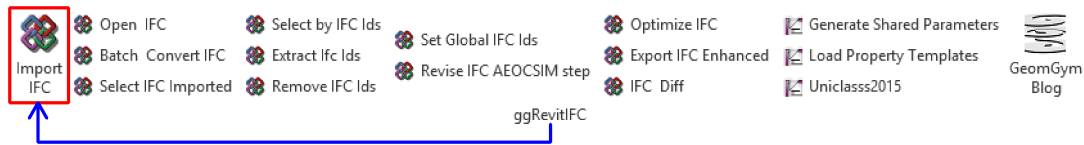


Abbildung 5.45: Benutzeroberfläche der Registerkarte Geometry Gym® in Revit®

Im Laufe des Importprozesses wird der Benutzer um die Präzisierung revitbezogener Einstellungen gebeten. Dabei getroffene Entscheidungen können sich zum Beispiel in den für den Import verwendeten RevitFamilien widerspiegeln. Der Rohrmantel kann an Stoßknoten um das dem Rohrradius gleichen Maß verkürzt werden (Abbildung 5.46).

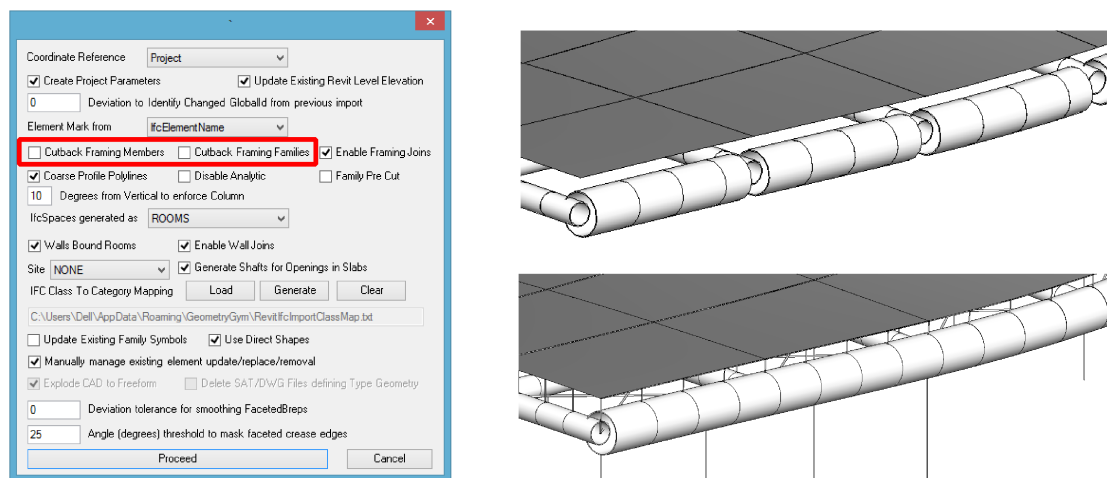


Abbildung 5.46: Einstellungen für Verschneidung der Hohlrohre bzw. Rohrmantel aus exakt übernommenen Systemlinien

Die importierte Form stellt, wie schon erläutert, eine Annäherung zu der exakten Form dar (Approximation of Bezier curves by circular arcs), aber ihre Abweichung bleibt im baubezogenen Toleranzbereich (Abbildung 5.47 auf der Seite 113).

Der Import der Flächen ist im Grunde genommen der Import von einzelnen Knoten, die in Gruppen aus 9 Knoten in je eine Fläche zusammengeführt sind. Um diese Knoten systematisch zu exportieren, erschien das Plugin Grevit zum Zeitpunkt dieser Arbeit als das einfachste Mittel in der Bedienung.

Die Verbindungsherstellung wird aus dem Register Zusatzmodule in Revit® durch die Funktion Grevit gestartet und anschließend in Grasshopper3D® fortgesetzt. Sowohl in Revit® als auch in Grasshopper3D® müssen vorher einige einfache Vorbereitungen getroffen werden.

Für einen erfolgreichen korrekten Export muss die für Flächenrepräsentation vordefinierte Familie in eine Revit® RVT-Datei vor dem Export hochgeladen sein. Diese Familie wird

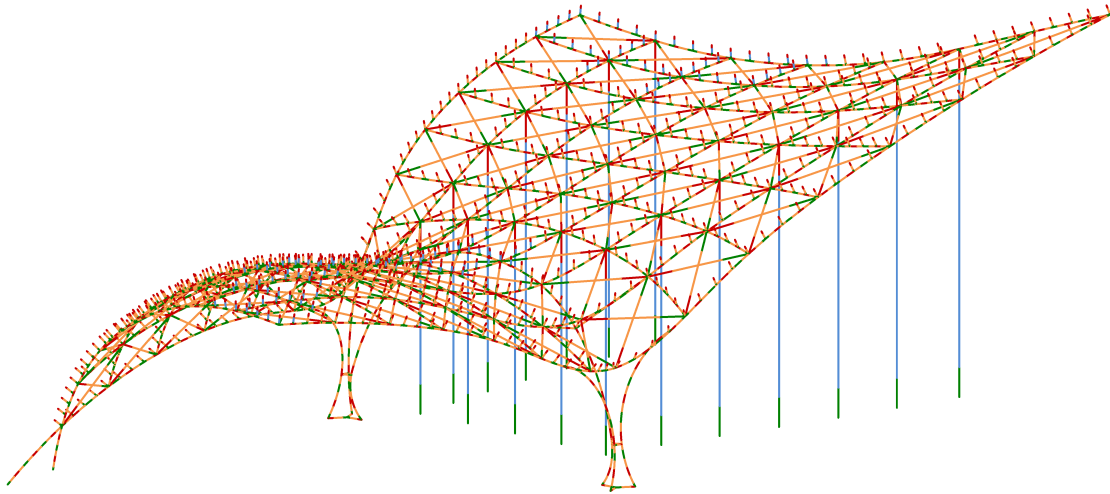


Abbildung 5.47: Berechnungsmodell in Revit®. Bezier-Splines sind angenähert durch Bogen repräsentiert.

als adaptiv bezeichnet, da sich ihre geometrische Form in Abhängigkeit von der Raumlage der Kontrollknoten definieren lässt (Abbildung 5.48).

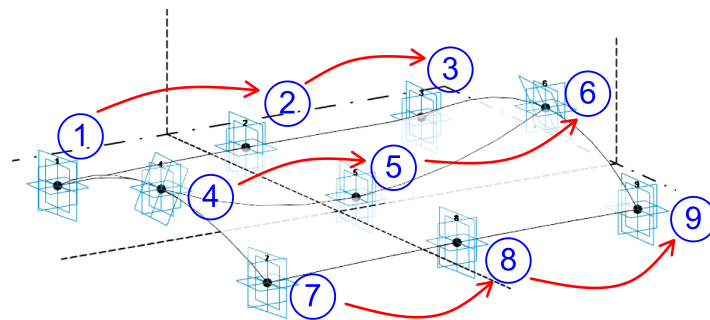


Abbildung 5.48: Reihenfolge der adaptiven Knoten in der Revit-Familie muss mit deren Reihenfolge in Grasshopper-„Baumzweig“ übereinstimmen

In der Regel wird eine adaptive Familie in einer RFA-Datei entworfen und danach in einem bestimmten Projekt geladen. Sie lässt sich mit Standardwerkzeugen in Revit® erstellen. Bestandteile sind lediglich 9 Knoten, die in einer strengen Reihenfolge abgesetzt sind (Abbildung 5.48) und denen die Eigenschaft „Als adaptiv definieren“ zugewiesen wurde. Als im Modell sichtbare Obersicht wird eine durch drei Kurven geloftete NURBS-Fläche verwendet (Abbildung 5.49 auf der Seite 114).

Nach der erfolgreichen Einfügung einer neuen Familie sieht man in der Familienstruktur deren Eintrag. Wenn keine Daten durch die Funktion „Nicht verwendete bereinigen“ aus dem Register „Verwalten“ gelöscht wurden, bleiben alle einmal hochgeladene Familien in der Datei drin, unabhängig vom Rechner, an dem diese Datei geöffnet wird.

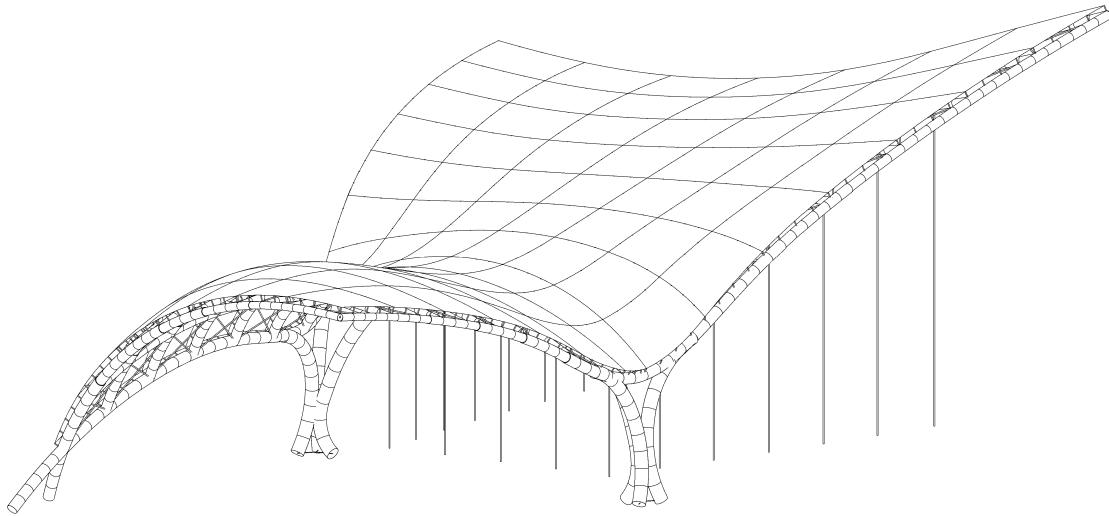


Abbildung 5.49: 3D-Visualisierung nach Flächenübergabe in Revit®.

Die Übertragungszeit für Flächen nimmt viel weniger Zeit in Anspruch als für Stabelemente. Die importierten Attribute werden den eingesetzten Familien zugeschrieben und nicht mehr parametrisch-assoziativ mit Modelldaten verknüpft. Es gibt keine parametrischen Zusammenhänge im 3D-Modell, außer in den intern vorliegenden früher vorbereiteten Familien.

Freie räumliche Stabelemente werden durch Familien des Typs Skelettbau(Tragwerk) inklusive ihrer analytischen Achsen repräsentiert. Vertikale Elemente werden als Tragwerksstützen erstellt. Parameter (Attribute) werden je nach benutzten Plugin vordefinierten Feldern zugewiesen (Abbildung 5.50 auf der Seite 115).

5.4.2 Detaillierter Workflow vom Berechnungsergebnis bis zum BIM-Programm „Allplan®“

Eines der wichtigsten Merkmale bei der Wahl Allplan® als BIM-Software ist die Verwendung des Rhino-Nativformats „3dm“ für den Export bzw. Import. Dadurch bekommt man eine Reihe von Vorteilen, aber auch einige Nachteile.

Zu den Vorteilen gehört:

- Übertragbarkeit unplanarer Linienelemente (räumliche Bezier-Splines) und exakter Flächenform (Komplexe Objekte wie NURBS werden in Allplan® Polyeder gewandelt) mithilfe des implementierten Parasolid-Modellierkerns, übernommen aus der Siemens PLM Software.
- Beschleunigte Export-/Importprozesse infolge der in Allplan® eingebauten Schnitt-

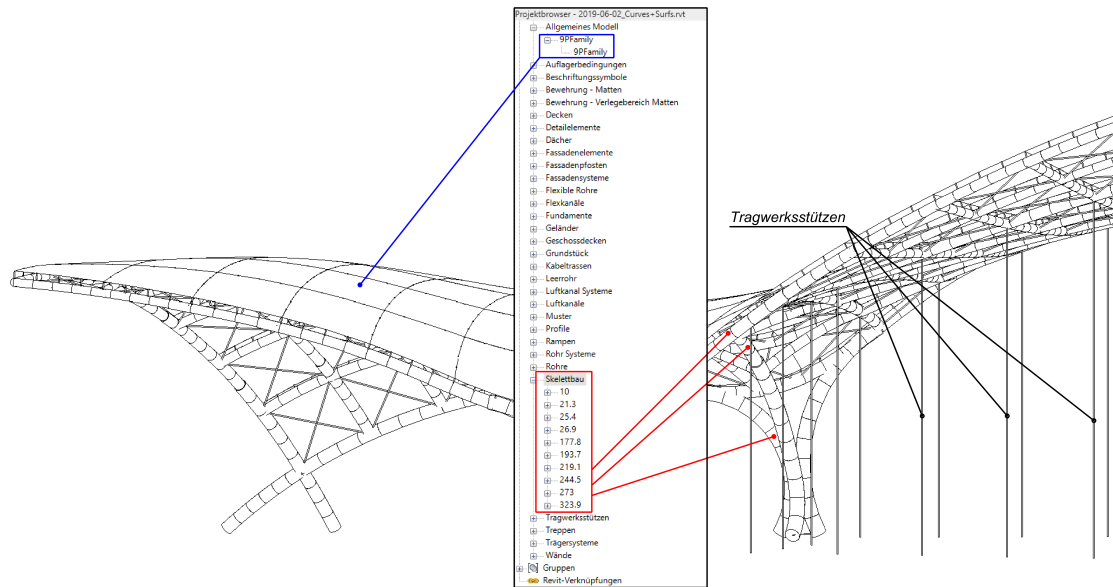


Abbildung 5.50: Familienbaum nach dem erfolgreichen Import in Revit®

stelle für die Einlesung des „3dm“-Formats

- Liste von Layern aus Rhino3D® wird mitimportiert, Elementenzuweisung bleibt erhalten (inklusive layerabhängige Farbenzuweisung).

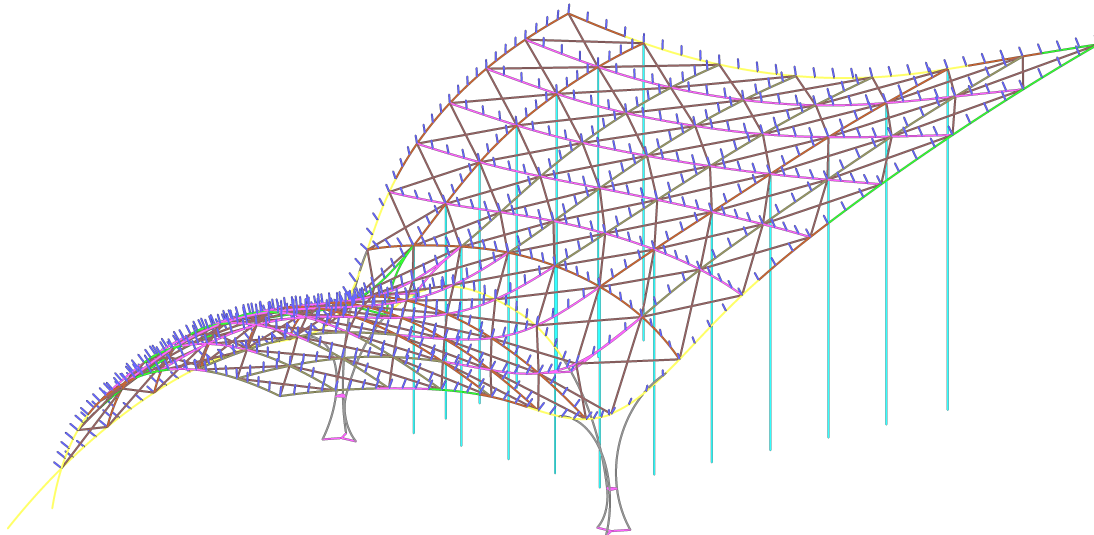


Abbildung 5.51: Berechnungsmodell in Allplan®. Bezier-Splines sind exakt repräsentiert.

Nachteilig kann Folgendes betrachtet werden:

- Begrenzte Attributenanzahl. Format „3dm“ lässt nur der Layername übertragen. Da dessen Länge in Allplan® mit 255 Zeichen begrenzt ist, können aus Rhino3D® genau so viele Informationen mitgenommen werden, wie man in dem angebotenen

Domain verschlüsseln kann.

- Hohlrohrkörper werden als Solid-Objekte oder gerade Kreiszylinder übertragen und besitzen somit weniger einstellbare Eigenschaften als in den intelligenten Revit-Bauteilen (adaptiven Familien)

Einzelschritte bei der Verwendung Allplan® als BIM-Endsoftware:

1. Interne Solids in Grasshopper3D® erstellen lassen. Das heißt mit internen Werkzeugen in Grasshopper3D® werden geschlossene BRep-Objekte programmiert. Flächenelemente, bei denen die Dicke im Bezug zu ihren Abmessungen irrelevant ist, dürfen unverändert bleiben, da sie ohne weiteres mit der gleichen mathematischen Beschreibung in Rhino3D® abgebildet werden. Komplexe Objekte wie NURBS werden in Allplan® Polyeder umgewandelt.
2. Farbzuzuweisung und Layerzuweisung mit autoerstellter Layerliste in Rhino3D®. Für die automatische Zuordnung semantischer Daten an die geometrischen Elemente in Rhino3D® werden wiederum bestehende Grasshopper-Werkzeuge benutzt. Unter dem Zielfeld für alle Informationen wird hier die Layerbezeichnung verwendet. Diese kann dann in Allplan® nach dem Import durch Pythonskript auseinander genommen und mit den internen Funktionen an die einzelnen Attributfelder den intelligenten Objekten oder Standardbauteilen zugeordnet werden.
3. Fixierte Geometrie mit dazugehörigen Layern im Nativformat exportieren und durch Standard-Importer in Allplan® importieren. Die Grasshopper-Geometrie durch die Backe-Funktion als eine feste Gruppe von Objekten in Rhino3D® abspeichern und mit dem Standardexporter in Rhino3D® als 3dm-Datei am Rechner ablegen. In Allplan® befindet sich der Rhinoimporter unter den anderen Import-Funktionen und fordert zum Zeitpunkt dieser Masterarbeit nur eine einzige Einstellung durchzuführen - Netzdichte (Wertebereich von 10 bis 200). Je höher der Wert, desto genauer werden komplexe Körper übertragen. Wenn für das Objekt in Rhino3D® bereits ein Netz besteht, dann wird beim Import die originale Netzdichte verwendet und die Eingabe der Netzdichte entfällt.

Im Beispielprojekt wurden jedem Rohrdurchmesser ein separate Layer zugewiesen, sodass man beim Export auch bis 255 Zeichen an semantischen Daten für jede Rohrgruppe mit gleichem Durchmesser übertragen kann. Die Filterung ist mit Farben am schnellsten. Farbige Darstellung der Geometrie gibt einen ausreichenden Überblick über das Tragwerk (Abbildung 5.52 auf der Seite 117). Die räumlich gekrümmten Stäbe mit Rohrmantel (Hohlzylinder) werden visuell geglättet dargestellt. Somit liegt das Repräsentationsvermögen in beiden BIM-Programmen auf dem relativ gleichen Niveau.

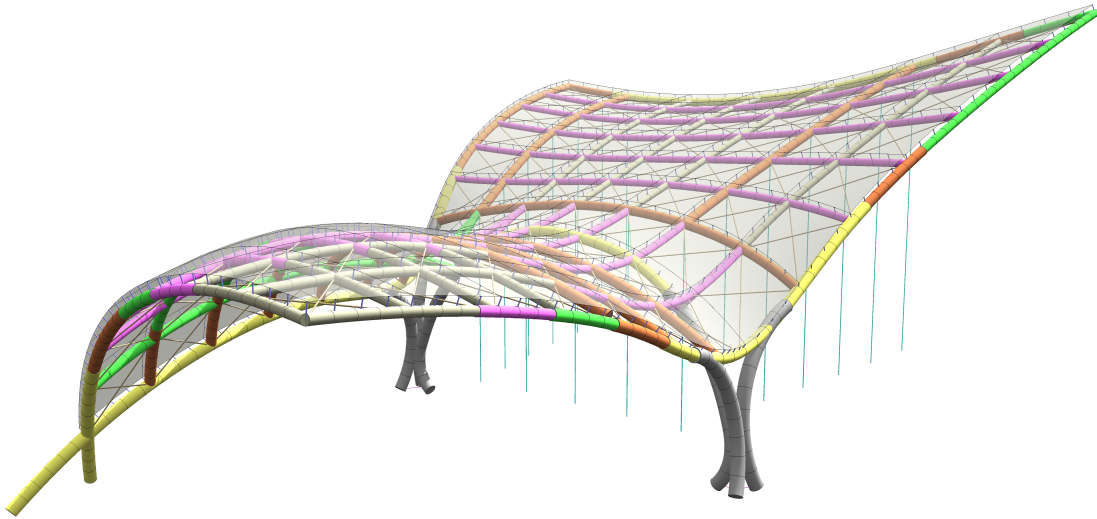


Abbildung 5.52: Visualisierung in Allplan®

5.4.3 Enddetaillierung und Werkstattplanung

Wie es im Abschnitt 5.4.2 gezeigt wurde, gibt es mehrere Wege zur Gestaltung der Werkstattplanung. Die Rhino-interne Werkstattplanung ist zukunftsweisend, ist zurzeit aber noch nicht reif genug für den täglichen Gebrauch. Die Allplan-basierte Werkstattplanung könnte in Zukunft auch einen größeren Potenzial bieten, was durch die Planableitungen im Kapitel 6 dargelegt wird. Die Revit®-Umgebung ist für die Werkstattplanung begrenzt anwendbar und kann durch die Weiterentwicklung auch potenziell verbessert werden.

Im Kapitel 6 wird anhand ausgewählter Details ein prinzipielles Vorgehen dargestellt. Die allgemeine Vorgehensweise schließt in sich visuelle Programmierung in einem der früher beschriebenen Programme ein: Rhino3D®, Revit® oder Allplan®. Danach kommt die programminterne Planableitung, Beschriftung und Listengenerierung.

6 Anbindung an die Werkstattplanung und beispielhafte Planableitungen

Die zur Präsentation der Möglichkeiten durchgeführte Werkstattplanung erfolgte an einem Ausschnitt in den Achsen A-D/10-14 aus der vorher untersuchten Struktur in der Grasshopper-Rhino-Umgebung.

Für die Beschriftung und Mengenermittlung wurde die 3D-Geometrie in das BIM-Softwarepaket Allplan überführt. Dies erlaubte die Durchführung einer angenäherten Untersuchung der Ergonomik und Funktionalitätsbreite bei der Verwendung einer BIM-fähigen Software als Werkzeug für die Ausführungsdokumentation.

Die ausgegebenen Pläne beinhalten farbige Ansichten und Schnitte der bearbeiteten Tragwerkhälfte mit den Profiltypangaben, beispielhafte Hohlrohrabwicklungen entlang ihrer Systemlinien und die ausgewählten aus dem Bereich der Achsen A-D/10-14 im 3D-Modell abgeleiteten Details.

Zeichnungen im Allplanprojekt werden in speziellen Dateiformaten abgespeichert (.npl-Dateierweiterung) und sind somit zugreifbar für die weitere Verwaltung. Aus dem 3D-Modell können 3D-PDF erstellt werden, welche dreidimensionale Elemente mit ihren Layern aus Allplan beinhalten. Dank der Instrumente im „Adobe Reader“ kann man interaktiv und ohne Allplaninstallationsbedarf Schnitte und Vermaßung in 3D-Umgebung erzeugen.

Die resultierenden 2D-Pläne können den DIN-A3-Blättern im Anhang entnommen werden. 3D-PDF mit der ganzen Tragwerksstruktur und deren Ausschnitten sind auf der beigefügten CD zu finden.

7 Fazit

Der Einsatz von Building Information Modeling (BIM) in der Tragwerksplanung kombiniert den parametrischen Entwurf, die nahtlose Anbindung von Werkzeugen für die Modellierung, Berechnung, Simulation und enge Koordination aller Projektbeteiligten miteinander. Der Mehrwert wird auf mehrere Beteiligte verteilt. Von einem informationsreichen Tragwerksmodell profitieren nicht nur Ingenieure und Architekten, sondern auch Baufirmen, Hersteller und Endnutzer.

Das Tragverhalten kann im Laufe der Vordimensionierung mittels skriptbasierter Komponenten mit eingebautem Finite-Elemente-Solver berücksichtigt werden. In der Entwurfsphase wird das Tragwerk aus Grasshopper3D[®] durch eine nahtlose Schnittstelle an das externe Programm für statische und dynamische Analyse Dlubal RFEM5 überführt. Die bidirektionale Ankopplung der Modellierungssoftware an die Berechnungssoftware gibt den notwendigen Freiraum für die interdisziplinäre Arbeit an den komplex geformten Flächentragwerken.

Im vorgestellten Konzept wird die urheberrechtliche Frage im Allgemeinen durch die passwortgeschützten Skriptanteile oder durch den Verzicht auf Übergabe jeglicher Skriptteile an andere Beteiligte gelöst. Für den Koordinations- und Collaborationszweck wird die Tragwerksgeometrie in einem proprietären Format fixiert. Das Skript als Grundlage dieser Geometrie bleibt immer im Firmenarchiv auf dem Server für eine weitere Nutzung bereit.

7.1 Überblick über den Aufbau der Arbeit

Im ersten Kapitel werden Aktualität der Thematik BIM, Forschungsfragen und Ziele der Masterarbeit formuliert. Im zweiten Kapitel werden grundlegende Begriffsdefinitionen erläutert, die die BIM-basierte Tragwerksplanung betreffen. Im Anschluss werden Chancen und Risiken der BIM-Arbeitsweise diskutiert.

Das Kapitel 3 ist dem Thema BIM im Membranbau gewidmet. Dort werden zunächst Aufschlüsse über Unterschiede zwischen Membranbau und anderen Baubereichen gegeben. Danach werden beim BIM-Einsatz relevante Problemstellen im Membranbau aufgedeckt und auf die Einzelheiten eingegangen.

Der abschließende Abschnitt 3.4 liefert Informationen über die möglichen Konzepte der

Zusammenarbeit bei Membranbauprojekten und gibt einen Überblick über ihre Schwächen und Stärken. Am Ende dieses Abschnitts erfolgt eine endgültige Zusammenstellung des Konzepts, das an dem beispielhaften Membranprojekt im Kapitel 5 erprobt wird.

Das Kapitel 4 beschreibt das zur Untersuchung vorgegebene Tragwerk, verwendet im praktischen Teil Methoden und Werkzeuge sowie Randbedingungen, die das untersuchte Tragwerksmodell vom realen Referenztragwerk unterscheiden. Das Kapitel 5 setzt sich mit der eigentlichen Anwendung des konzipierten BIM-Workflows auseinander. Im darauffolgenden Kapitel werden beispielhafte Planableitungen in der BIM-Umgebung generiert.

Das letzte Kapitel fasst die Ergebnisse der Masterarbeit zusammen, listet die gefundenen Defizite auf und gibt Ausblick über den weiteren Forschungsbedarf.

7.2 Zusammenfassung des Gesamtergebnisses

Die Ergebnisse dieser Arbeit lassen große Potenziale beim Einsatz BIM im Membranbau erkennen. Die Vorteile liegen in einer größeren Transparenz und Durchgängigkeit des Planungsprozesses. Informationen von jedem Beteiligten werden weitergegeben und gepflegt, was zu einem größeren Gewinn bei der Bauausführung und Nutzung führen kann.

Es wurden verschiedene Wege der Prozessorganisation beim Einsatz BIM-Arbeitsmethode im Membranbau untersucht. Der Umfang der Untersuchung schließt in sich die Planungsphasen vom Entwurf bis zur Werkstattplanung ein.

Als Hauptmethode des praktischen Teils wurde das parametrische Entwerfen des Tragwerksmodells in Grasshopper3D[®] mit der visuellen Programmierung und der textlichen C#-Programmierung für die Erweiterung der Funktionalität vorhandener Schnittstellen für Export und Import zwischen einzelnen Programmen der BIM-Kette verwendet.

Meilensteine der Masterarbeit:

- parametrischer Entwurf der Geometrie (Rhino3D[®], Grasshopper3D[®])
- Berücksichtigung und Implementierung aller Konstruktionselemente: Stahl, Seile, Glas, Membrane
- Auswahl und Erweiterung der Schnittstelle nach RFEM für Strukturelemente und Flächengenerierung
- Programmierung der Schnittstelle von RFEM nach Grasshopper3D[®] für Übernahme der Querschnittsinformationen zur weiteren Bearbeitung oder Nutzung

- Untersuchung der IFC Schnittstelle zum Aufbau des BIM Modells in Revit®
- Arbeiten mit Familien in Revit® (Flächen als adaptive Familien)
- Strukturierung und Überarbeitung des BIM-Modells in Revit® und Allplan®
- Vergleich der Vorgehensweise in Revit® und Allplan®
- Formulierung möglicher Wege zur Anbindung der Werkstattplanung

7.3 Interpretation der Ergebnisse (Ergebnisse der Einzelkapitel)

Die Einleitung gibt Erläuterungen über die Aktualität der BIM-Thematik im Allgemeinen und bezogen auf leichte Flächentragwerke. Als Beweisquellen werden Fachliteratur, aktuelle und entstehende Normen weltweit und gesetzlich verabschiedete Vorschriften bewertet. Im Kapitel Grundlagen zeigte die Literaturrecherche eine große Streuung in den verwendeten Begriffsdefinitionen. Die mit BIM verbundenen Normen, Regeln und praktischen Ansätze befinden sich in Entwicklung und sind logischerweise an regionale Planungsverfahren angepasst. Die daraus resultierenden Folgen wurden anhand einiger Beispiele erörtert. Auch die organisatorische Gestaltung des Einstiegs in die Planung mit BIM wurde aufgezeigt. Die entstehenden BIM-Vorteile wurden mittels Risikoanalyse kritisch untersucht.

Im Kapitel „BIM im Membranbau“ wurden Anforderungen an die BIM-Membranbauplanung festgestellt und mit den BIM-Vorgehensweisen in anderen Baubereichen verglichen, Defizite aufgedeckt, Herausforderungen genannt. Als Ergebnis wurde das Konzept einer funktionierenden BIM-Vorgehensweise vom Entwurf bis zur Werkstattplanung für Membranbauprojekte vorgestellt. Die Beschreibung des Beispielprojekts gibt Aufschluss über das Projekt, seine Randbedingungen, bei dessen praktischer Überarbeitung und über die dabei verwendeten Werkzeuge und Methoden. Der praktische Teil behandelt in Einzelschritten die im Kapitel 3 formulierte Vorgehensweise und dokumentiert alle Zwischenschritte von der Entwurfsphase bis hin zur Werkstattplanung und mit Planausgaben für die Bauausführung. Als Ergebnis wurde die Bestätigung der Funktionsfähigkeit des formulierten Konzepts erhalten. Nachteilig erwies sich die niedrige Flexibilität bei der Übertragung semantischer Daten. Die Anknüpfung berechnungsbezogener Daten an die geometrischen Daten und der Übergabeprozess nach RFEM selbst nimmt bei dem bearbeiteten Projekt durchschnittlich sieben Minuten Zeit in Anspruch. Der mögliche Zeitverbrauch bei größeren Projekten sollte proportional zur Projektkomplexität berücksichtigt werden.

Erkenntnisse über sich wiederholende Lösungsstrategien beim parametrischen Entwerfen:

- Berücksichtigung der Reihenfolge von an die Komponenten anschließenden Daten
- Ausgeklügeltes Datenmanagement bei den Listen und Bäumen (besonders oft Veredelung oder Abflachung)
- Regelmäßige Prüfung auf gleiche Ausrichtungen der Kurven (Linienelemente) in Listen
- Regelmäßige Prüfung auf überlappende (doppelte oder mehrfache) Knoten und Kurven
- Beachtung der Empfindlichkeit räumlicher Flächen zu den Einstellungen von Skriptkomponenten, denen sie bei ihrer Regenerierung ausgesetzt sind (Oft nur Approximation im bestimmten Toleranzbereich möglich)

7.4 Rückschlüsse

Jedes Tragwerk im Membranbau ist ein Unikat. Daraus ergibt sich eine große Vielfalt an zu verwendenden Details. Das führt zur Notwendigkeit der Untersuchung vieler verschiedener Varianten. Zur Erleichterung der Erstellung einzelner Varianten muss der Tragwerksingenieur auch programmieren können, was letztendlich zur Aufwandsparnis führen wird. Es lassen sich folgende Rückschlüsse zusammenfassen:

Zu den negativen Seiten:

- lange Einarbeitungszeit in das Programmieren mit C# RF-COM-Schnittstelle,
- zeitaufwändige Versuche und Ergebnisvergleich wegen großer Palette von Alternativen für die Datenübertragung zwischen den Programmen.

Zu den positiven Seiten:

- Visuelles Skripten erleichtert den Einstieg in die Programmierung allgemein für Nichtprogrammierer. Geschickte Manipulierung mit zurzeit vorhandenen visuellen Skripten führt zur Erhöhung der Effizienz sowohl bei Variantenerstellung als auch bei der Ausbildung. Dafür braucht man eine regelmäßige Strukturierung und Systematisierung des im Web verteilten Erfahrungsschatzes anderer Entwickler. So kann man ein nachhaltiges Fundament für weiteren Wissenstransfer schaffen.

Zu den Erfolgsfaktoren bei der zukünftigen Tragwerksplanung mit der BIM-Arbeitsmethode im Membranbau:

- *Katalog* (Datenbank oder Bibliothek) der parametrisch geskripteten Details aus dem Membranbaubereich zum Austausch der verwendeten Skripte und der Dokumentierung ihrer Einsatzgebiete und der dahinterstehenden Logik des Algorithmus. Alternativ auch Online-Datenbank für kooperierende Planungsbüros. Eine strukturierte und systematisierte Datenbank fehlt noch. Für die Zukunft kann man eine solche Datenbank nach dem Vorbild der EvaluierungsDatenbank für Tragwerksplanung bei Massivbauprojekten von (Harte, Stopp 2016) aufbauen.
- *Wissensverwaltung*
Als ein wichtiger Bestandteil der Aneignung der neuen parametrischen Vorgehensweise kann man Revers Engineering ansehen. Darunter versteht man die Auseinandersetzung mit frei zugänglichen Algorithmen (visuellen Skripten). Es wird eine selbständige Durchforstung von allen Web-Quellen durchgeführt und nach den bestimmten Skripten gesucht. Anschließend wird die Algorithmuslogik der jeweiligen Struktur(skripts) entschlüsselt. (Auf solche Weise lernt man Schritt für Schritt die interne Logik dahinter). Der Ansamlungsprozess von verschiedenen Beispielen aus den Web-Quellen, die Untersuchung und Dokumentation der dort verwendeten Algorithmen stehen im Fokus der ordnungsgemäßen Wissensverwaltung.
- *Qualifizierte Mitarbeiter* mit Kenntnissen visueller und textueller Programmierung

Herausforderungen auf dem Weg zur Effizienzsteigerung:

- Kompetenzen können nur mit einer längeren Ausbildung erworben und praxisbezogen verankert werden. Hybrid eines Bauingenieurs und Programmierers.
- Leistungsfähige Rechner und Arbeitsstationen bei komplexen Projekten und hohem Detaillierungsgrad zwingend erforderlich.
- Erwartung an mehr Aufgeschlossenheit seitens Softwarehersteller für die Erteilung des Zugangs zu deren proprietären API-Schnittstellen.
- Jedes Tragwerk im Membranbau hat individuelle Eigenschaften, was Wiederverwertbarkeit des visuellen Skriptes erschwert.
- Expertenwissen wird oft rechtlich geschützt, Zugriff nur für Mitarbeiter des jeweiligen Planungsbüros.
- Einbezug der Produkthersteller in früheren Planungsphasen bedarf neuer Formen der Zusammenarbeit

7.5 Weiterer Forschungsbedarf

Weitere Fragestellungen wären für eine tiefere Ausarbeitung von Interesse:

- Die Integration der Formfindung in der Konzeptfindungsphase mit anschließender Übernahme der gefundenen Form als Basisfläche für die weiteren Schritte.
- Repräsentativer Vergleich mehrerer BIM Programme anhand weiterer Projekte aus dem Bereich Membranbau (zum Beispiel mit Formfindungsbedarf), Bewertung der programmspezifischen Unterschiede und Formulierung möglicher Vorschläge für die Modifikation des in dieser Arbeit dargestellten Konzepts,
- Untersuchung weiterer alternativen Strategien der Datenflussorganisation bei der Anwendung der BIM-Arbeitsmethode in den Membranbauprojekten, zum Beispiel eine stärkere Zentralisierung der Modelldaten auf dem entfernten Server und deren geschützte Verarbeitung in den ankoppelnden Programmen für Tragwerksberechnung und Simulation.
- Übergang zu dem kompletten Planungsprozess innerhalb einer BIM-fähigen Software in den Membranbauprojekten mit nachfolgendem Export nach anderen „standalone“ oder cloudbasierten BIM-Alternativen.
- Anfertigung der Metallbauteile aus dem Membranbaubereich im Werk mit robotisierter CNC-gesteuerter Produktion. Perspektiven und Organisationsstrategien. Ob sich durch Anwendung der BIM-Arbeitsmethode Vorteile einstellen.
- Realisierung des kompletten Werkstattplanungsprozesses in den Membranbauprojekten mittels visueller Skripte in Grasshopper3D®. Eingehende Untersuchung der Rechnerkapazitäten bei den großen Tragwerksmodellen und komplexorganisierten Verschneidungsbereichen und Zuschnittmustern.

Sekundäre Themenfelder für weitere Forschung:

- Einbau eines sogenannten Expertensystems in das BIM-Konzept, das dafür sorgt, dass bestimmte tragwerksplanerische Regeln nicht umgangen werden. (Mehr geeignet für Zivilbau, wo es viel mehr normenfixierte Randbedingungen gibt, als bei den frei geformten Flächentragwerken).
- Ausarbeitung von Präventionsmaßnahmen gegen Inkonsistenz bei der Verwendung der BIM-Arbeitsmethode im Membranbau. Eine Analogie dafür wäre die Funktion der Plausibilitätskontrolle in RFEM. Ein weit verbreitetes Beispiel einer möglichen Kontrollfunktion wäre das Eliminieren von sich überlappenden Linien. Dies kann besonders dann vorkommen, wenn Membranfläche und Halterungsprofile für die Membranstruktur in ein Berechnungsmodell zusammen übertragen werden.

- Weitere Ausweitung der Funktionalität des in dieser Masterarbeit behandelten Plugins RhFEM. Zusätzliche Programmierung neuer Grasshopper-Komponenten für die:
 1. Übergabe exakter Kurvengeometrie in RFEM-Bezier-Linien;
 2. Generierung flächengebundener Lastfälle und Lastkombinationen in RFEM;
 3. größere Querschnittswahl bei dem Export der Daten aus RFEM. In erster Linie sind I-Profile und Rechteckprofile mit Rotationsbedarf um ihre Achse (Systemlinie) von Interesse (zum Zeitpunkt dieser Masterarbeit sind nur runde Querschnitte und Hohlprofile möglich).
- Weitere Ausweitung der Funktionalität von Grasshopper3D[®] und im Bezug auf das Modul Karamba3D[®] für die Organisation der normenkonformen Ausgabe von Berechnungsergebnissen aus Karamba3D[®] und anderer Module für Formfindung, statische und dynamische FE-Analyse direkt in Rhino-Umgebung.
- Verifikation und Zertifizierung von Grasshopper-Modulen für Formfindung, statische und dynamische FE-Analyse im Bereich leichter Flächentragwerke in Anlehnung an laufende Forschungsvorhaben aus dem Bereich Hochbau (vergleiche die offizielle Web-Quelle unten¹).

Zu folgenden Punkten ist eine Klärung erforderlich:

- Wie lässt sich sogenannte 4D und 5D-Modellierung im Rahmen eines Membranbauprojektes organisieren?
 - Welche Verfahren und Werkzeuge ermöglichen uns (halb-)automatische Ablaufplanung und Kostenberechnung eines Membranbauprojektes?
 - Wie vorteilhaft ist die Benutzung der vorhandenen Werkzeuge für Ablaufplanung und Kostenberechnung auf Basis des dreidimensionalen Modells?
 - Wie lässt sich die sogenannte 4D- und 5D-Modellierung im Rahmen eines Membranbauprojektes organisieren?
 - Welche Verfahren und Werkzeuge ermöglichen uns (halb-)automatische Ablaufplanung und Kostenberechnung eines Membranbauprojektes?
 - Wie vorteilhaft ist die Benutzung der vorhandenen Werkzeuge für Ablaufplanung und Kostenberechnung auf Basis des dreidimensionalen Modells eines Membranbauprojektes?
- Lässt sich Effizienz oder Transparenz des BIM-Konzepts im Membranbau durch die Verwendung datenbankbasierter („excelbasierter“) Datenmanagementssysteme erhöhen?

¹<https://www.evadat.de/display/EVA/EvaDAT+-+Evaluierungsbeispiel-Datenbank>

- Lassen sich Produkthersteller in das BIM-Konzept bei Membranbauprojekten integrieren? Welche Vor- und Nachteile ergeben sich aus ihrer Integration?
- Wie perspektiv ist die Umwandlung Rhino3D® in ein komplett BIM-fähiges Programm und wie viel Unterstützung soll seitens der Ingenieure aus dem Bereich Membranbau für deren Erfolg geleistet werden?
- Welche Vorteile und Nachteile ergeben sich aus der Enddetaillierung und Plangestaltung mittels Rhino-Grasshopper-Werkzeugen und ihrer Erweiterungen?
- Wie vorteilhaft erscheint die Werkstattplanung in Grasshopper3D® gegenüber spezialisiert ausgerichteten Softwarelösungen wie Advance Steel® oder Inventor®?
- Möglichkeiten der Kombination verschiedener Softwarepakete für Werkstattplanung im Stahlbau und Membranbau.

Mögliche Fragestellungen mit dem Schwerpunkt „Parametrische skriptenbasierte Modellierung“:

- kann das einmal erstellte Modell ausschließlich über skriptbasierte Beschreibung in einem beliebigen „externen“ Programm nachvollzogen werden? (Kann zum Beispiel ein einmal erstelltes Python-Skript sowohl in Allplan® als auch in Rhino-Grasshopper3D® funktionieren?)
- Wenn kein durchgängiger parametrisch-assoziativer Ansatz möglich ist, wie kann dann der Workflow so gestaltet werden, dass möglichst wenige Parameter oder Attribute verlorengehen? (Zu den Parametern werden in dem Fall auch Layerzuweisungen, Gruppierung einzelne Bauteile miteinander, auch mit ihren Abhängigkeiten zueinander, gezählt.)
- Wie kann die Methode beidseitiger Änderungen beim Datenaustausch zwischen verschiedenen Programmen konzeptioniert werden?
 - Werden einzelne Varianten (zur Variantenplanung/Besprechung mit allen Stakeholder (dem Bauherr/Architekt)) automatisch gespeichert?
 - Wird Bauteil-ID beim Austausch konsistent gehalten?
 - Kann man die Geschichte von Änderungen mit Verantwortlichkeiten verfolgen?
 - Werden Änderungen, die mehr, als einen Planungsbereich (Planer) betreffen, als Report/Warnungsmeldung mit einer klaren Anbindung an eine konkrete Modellstelle an alle Planungsbeteiligte geschickt?

Tabellenverzeichnis

1.1	Überblick über die international verabschiedeten (geplanten) BIM-Normen (Vollständige Bezeichnungen findet man im Anhang).	7
3.1	Gegenüberstellung BIM-Arbeitsmethode im Massivbau und Membranbau	40
3.2	Gegenüberstellung klassischer und BIM-Arbeitsmethode (im Bezug auf Membranbau)	44
3.3	Positive und negative Folgen der Verwendung textlicher Programmierung statt nur Export-Austauschformate	58
3.4	Überblick über von „RhFEM“ übertragbare Elemente	67
3.5	Überblick über die getesteten Plugins für Revit	72

Abbildungsverzeichnis

1.1	Annahmequote der Innovationen	1
1.2	BIM-Nutzung nach Anwendergruppen (Stand 2013)	3
1.3	BIM-Nutzung nach Anwendergruppen (Stand 2018)	3
1.4	Verbindliche Einführung BIM-Projektausführung bei öffentlichen Projekten nach Ländern	5
1.5	Anzahl von Beiträgen im Tagungsband „Baustatik-Baupraxis“, die inhaltlich BIM betreffen: a) Anzahl der Beiträge im Tagungsband insgesamt und mit dem BIM-Bezug b) Prozentualer Anteil der betreffenden BIM-Thematik Beiträge von der Gesamtanzahl	6
1.6	Überblick über die BIM-Normenentwicklung in Deutschland	8
1.7	Einfluss von integraler parametrisch unterstützter Planung	10
1.8	Einsatzbeispiele des parametrischen Entwurfs	10
2.1	Mehrdeutigkeit bei dem Akronym BIM	17
2.2	Darstellung der Reifegrade der Gebäudeinformationsmodellierung	18
2.3	Überblick über die vorkommende LoX-Definitionen	20
2.4	LoD nach britischer Norm im Verhältnis zu den amerikanischen AIA-Vorgaben	21
2.5	Terminologische Diskrepanz möglicher LoD-Definitionen	22
2.6	Austauschkette zwischen BIM-Projektteilnehmern	25
2.7	Mögliche Wege von Closed-little-BIM zu Open-BIG-BIM-Arbeitsmethode	26
2.8	Fallbeispiele zu den vier Arbeitsprinzipien	27
2.9	Grobablauf bei der Standard-Vertragsstruktur Generalplaner - Generalunternehmer (mit Leistungsphase 5 HOAI)	34
2.10	Auftraggeberinformationsanforderungen aus einer digitalen Datenbank	36
3.1	Formfindung, Statik, Montageplanung (Planungsprozess biegeeweicher Tragelemente)	41
3.2	Mögliche Bauteilstrukturierung in einer BIM-Umgebung	42
3.3	Referenzierung der Bauteilstrukturierung nach den formgebenden Elementen	43
3.4	Datenverlust bei konventioneller Arbeitsmethode	45
3.5	Beschreibung der gekrümmten Elemente im CAD mit NURBS und Bezier-Splines	47
3.6	Fallbeispiel für die Aufteilung der Verantwortungsbereiche bei der Interaktion einer neuentwickelten Überdachungsstruktur mit dem bestehenden Gebäude	50

3.7	BIM-Programm mit Werkzeugen für die parametrische Planung als das Grundgerüst für den ganzen Workflow	56
3.8	Grasshopper 3D [®] mit Rhino3D [®] bildet das Grundgerüst für das ganze Workflow	57
3.9	Anreicherung des 3D-Modells mit Informationen	58
3.10	Überblick über die behandelten Schnittstellen für den Import externer Daten in Dlubal RFEM v.5.18	59
3.11	Die durch das DStV-Format übertragbaren Strukturelemente	61
3.12	Vergleich IFC mit einem Schuhschrank	62
3.13	Entwicklungsstand bei IFC-Format (Stand 2017)	62
3.14	Erweiterung der Geometriebeschreibung bei IFC4	63
3.15	Schematische Darstellung der tabellenbasierten Datenübertragung	65
3.16	Bidirektionaler Informationsfluss zwischen Grasshopper 3D [®] und RFEM v.5.18 anhand RF-COM-Schnittstelle	66
3.17	Zuordnung geometrischer und semantischer Daten zueinander	67
3.18	Untersuchte Varianten der Werkstattplanungseinbindung	69
3.19	Arbeitsverteilung auf mehrere Planungsbüros. Frühzeitige Koordination ist notwendig.	70
3.20	Varianten der Eingliederung der Werkstattplanung in BIM-Datenfluss	70
3.21	Überblick über für BIM-Konzeptsuche ausgewählte Softwarepakete	71
3.22	Anwendung zwei verschiedener Schnittstellen für Stabelemente und für Flächenelemente beim Import nach Revit.	72
3.23	Rhino-Allplan [®] Informationsfluss mittels 3dm-Formats	75
3.24	Konzept für BIM im Membranbau. Allgemeiner Überblick	76
3.25	Rhino als BIM-fähige Software	79
4.1	Allgemeine Darstellung des Projekts	80
4.2	Kreislauf vom Skript bis zum BIM-Modell	81
4.3	Fassadenansicht auf den Museumseingang von nördlicher Gebäudeseite	82
4.4	Querschnitt durch den Museumseingang von nördlicher Gebäudeseite	82
4.5	Linke Tragwerkshälfte im praktischen Teil	84
5.1	Die übergeordnete Gliederung des Kapitels 5	86
5.2	Vollständig flächenabhängige Elemente	87
5.3	Halbmanuell gesteuerte Elemente	87
5.4	Nichtparametrisch einzugebende Informationen	87
5.5	Aufteilung des visuellen Skriptes in einzelne Abschnitte	88
5.6	Einfluss der Stichhöhen auf die Endform	89
5.7	Die NURBS-beschriebene Geometrie einer unabgeschnittenen Fläche als Basisfläche aus einer DWG-Datei.	90
5.8	Direkt übernommene Fläche mit ungeeignetem U- und V-Raster.	90

5.9	Rekonstruktion der Basisfläche durch Extraktion mehrerer Linien und dazugehöriger Knoten	91
5.10	Erforderliche Bogenabhängigkeit beim U-/V-Flächenraster	91
5.11	Berücksichtigung des Hauptbogens bei der Rekonstruktion der Flächentopologie und dessen Einfluss auf das Flächenraster	92
5.12	Die schematisch dargestellte Aktionsreihenfolge bei der Flächenrekonstruktion. Die Basislinien auf der linken Seite würden zu deren ungeeigneter Projektion auf die ursprüngliche Fläche führen (Schnitt 1-1).	92
5.13	Abweichung von einer geraden Linienform der rasterbildenden Isokurven wird parametrisch gesteuert	93
5.14	Dritte Basislinie als Isokurve in der Flächenmitte bekommt kleinere Anzahl an Zwischenknoten	93
5.15	Zwischenschritte bei der Rekonstruktion der Basisfläche: neu generierte Splines bilden neue Rastergrundlage	94
5.16	Vorbereitung der Basiskurven für die zu „loftende“ Fläche	94
5.17	Linearisierte Flächengeometrie in Bereichen mit den gelöschten „störenden“ Kurven (Bei der Verwendung „Loft“-Komponente)	95
5.18	Unzureichende Dokumentation der Optionauswirkungen in der Standard-Hilfe in Grasshopper3D®	95
5.19	a)-c) Einfluss drei verschiedener Loft-Optionen auf die Ausbildung des Rasternetzes: a) bei „Normal“-Option b) bei „Loose“-Option c) bei „Tight“-Option d) Aufteilung der Basisfläche in zwei separate Teile führt zur Verkrümmung der Längsträgerachsen im Stoßbereich	96
5.20	Zusammenfassung der Skriptingbereiche für bessere Überschaubarkeit . .	97
5.21	Vergleich des Referenzmodells mit dem Grasshopperskript: die Ebenen für membranhaltende Profile und für Träger stellen zwei verschiedene Arbeitsebenen dar, die für die Abstandhalterdefinition aneinander geknüpft werden müssen.	97
5.22	Zerlegung der ganzen Membranform in die einzelnen Rechteckflächen . . .	98
5.23	Kurvensegmentierung - Splinesegmente in Linien aus zwei Knoten	98
5.24	Segmentierung der Membranbegrenzungslinien und Trägerachsen	99
5.25	Quadrangel-Flächentyp als Referenztyp im FE-Programm	99
5.26	Extraktion einzelner Kurven aus der Flächenebene durch die Verwendung verschiedener Vorgehensweisen	100
5.27	Schematische Darstellung der Skriptenarbeit	101
5.28	Lokale Achsensysteme für Abstandhaltererzeugung	101
5.29	Erste Kurvensegmentierung - in feinere Splines	101
5.30	Ein Beispiel für die Generierung der Aussteifungsverbände: a) 1.Diagonalenrichtung - mit „Braced Grid 1-D Structure“-Komponente abgehandelt, b) 2.Diagonalenrichtung - mit „2D Truss“-Komponente abgehandelt	102

5.31	Algorithmusbeschreibung für die Generierung der Aussteifverbände mit weichen Druckstäben	103
5.32	Sonderfall bei der Bildung von Aussteifungsverbänden	103
5.33	Unterstützungsbereiche - Überblick über Bestandteile entsprechend Skript in Grasshopper3D®	104
5.34	Hauptbogen unter der Arbeitsebene für Trägerrost	104
5.35	Die korrekte Übernahme des Richtungsvektors an der Anschlussstelle des Hauptbogens zu der Stütze	105
5.36	Glaswände - Definition in Grasshopper3D® mit Vorschau	105
5.37	Segmentierung - mögliche Varianten	106
5.38	Eigener nutzerdefinierter Eintrag im RFEM-Querschnittskatalog	107
5.39	Definition der Starrstäbe in der Memberkomponente	107
5.40	Gelenkdefinition bzw. Federsteifigkeit	107
5.41	Flächenexport nach RFEM	108
5.42	Rückkopplung ursprünglicher Topologie an die geänderten Querschnitte	109
5.43	Rückkopplung Strukturelemente an die exakt beschriebenen Kurven	110
5.44	Überführung gekrümmter Splines in Bogensegmente	111
5.45	Benutzeroberfläche der Registerkarte Geometry Gym® in Revit®	112
5.46	Einstellungen für Verschneidung der Hohlrohre bzw. Rohrmantel aus exakt übernommenen Systemlinien	112
5.47	Berechnungsmodell in Revit®. Bezier-Splines sind angenähert durch Bögen repräsentiert.	113
5.48	Reihenfolge der adaptiven Knoten in der Revit-Familie muss mit deren Reihenfolge in Grasshopper-„Baumzweig“ übereinstimmen	113
5.49	3D-Visualisierung nach Flächenübergabe in Revit®.	114
5.50	Familienbaum nach dem erfolgreichen Import in Revit®	115
5.51	Berechnungsmodell in Allplan®. Bezier-Splines sind exakt repräsentiert.	115
5.52	Visualisierung in Allplan®	117

Literaturverzeichnis

BSI-Group . BIM FAQ – Alles zur neuen ISO 19650 Transition. Online-Ressource: <https://www.bsigroup.com/de-DE/Unsere-Dienstleistungen/Produktzertifizierung/BIM/BIM-FAQ-Transition/> (Abgerufen am 20.06.2019). 2019.

Baldwin Mark, e. V. DIN., AG Mensch und Maschine Schweiz. Der BIM-Manager: Praktische Anleitung für das BIM-Projektmanagement. Berlin: Beuth Verlag, 2018. 1st ed. 332. (Beuth Innovation).

Beer Gernot. Berichte der Fachtagung Baustatik - Baupraxis 11 am 21. und 22. Februar 2011 an der Universität Innsbruck. Graz: Inst. für Baustatik, 2011. 468.

Behnke T. Building Information Modeling Early- und Late-Adopter // 30. Forum Bauinformatik. Weimar: Blueprint. e.K., 2018. 47–54.

Bletzinger Kai-Uwe. Formoptimierung von Flächentragwerken. München, 1990. 256.

Bletzinger Kai-Uwe. Berichte der Fachtagung Baustatik - Baupraxis 12 am 24. und 25. Februar 2014 an der Technischen Universität München. München: Lehrstuhl für Statik Techn. Univ. München, 2014. 1–200.

Both Petra von, Koch Volker, Kindsvater Andreas. BIM - Potentiale, Hemmnisse und Handlungsplan: Analyse der Potentiale und Hemmnisse bei der Umsetzung der integrierten Planungsmethodik Building Information Modeling - BIM - in der deutschen Baubranche und Ableitung eines Handlungsplanes zur Verbesserung der Wettbewerbssituation. 2844. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl., 2013. 236. (Forschungsinitiative ZukunftBau F).

Dr. Wieselhuber und Partner . BIM - are you ready?
https://www.wieselhuber.de/publikationen/publikation/-/186/BIM_are_you_ready/ (Abgerufen am 17. Juni 2019): Studie. München, 2018.

Eastman Charles M. BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors. 2011. 2. ed.

Eisfeld Michael, Hartmann Friedel, Dietz Jörg. Forschungsprojekt Tragwerk-FMEA: Präventive Qualitätssicherung in der computerbasierten Tragwerksplanung durch Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse ; [Abschlussbericht. F 2803. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl., 2012. 340. (Forschungsinitiative Zukunft Bau).

Flury Marco. BIM in der Tragwerksplanung. Status und Ausblick. 2015.

- Fuchs Maximilian, Perla Michael, Lehnert Jochen, Niederberger Katharina.* Integrierte Planung im Industriebau // Bautechnik. 2013. 90, 10. 622–625.
- Glockner Oliver.* BIM - Einstieg kompakt für Produkthersteller: Die Bedeutung von BIM für Hersteller von Bauprodukten. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2016. 56. (Beuth Pocket).
- Grunwald Gregor, Ihde André.* Challenges of the implementation of Membrane Structures into BIM // Structural Membranes 2017 // VIII International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures 2017. 1. Barcelona: International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), 2017. 294–302.
- Harte R., Stopp Kirsten.* Forschungsvorhaben "Konzeption und Aufbau einer standardisierten Beispieldatenbank für softwaregestützte Tragwerksberechnung in Anlehnung an VDI 6201 für den Einsatz von Statik-Software in BIM-basierten Prozessketten": URL: www.statik.uni-wuppertal.de/de/forschung/einzelne-forschungsvorhaben/forschung-22.html: Abgerufen am 11.06.2019. Wuppertal, 2016.
- Hausknecht Kerstin, Liebich Thomas.* BIM-Kompendium: Building Information Modeling als neue Planungsmethode. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2016. 1–200.
- Helmus Manfred, Meins-Becker Anica, Kelm Agnes, Klusmann Boris, Pütz Carla, Zibell Michael.* Methodik und Instrumente zur Verbesserung der Arbeitsplanung in kleinen und mittleren Unternehmen der Bauwirtschaft unter Einsatz des Building Information Modeling. F 3111. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2018. 219. (Forschungsinitiative ZukunftBau).
- Holtschmidt Matthias.* „BIM lässt eine Marktbereinigung erwarten“ Architekten im Interview. Online-Ressource: <https://www.build-ing.de/fachartikel/detail/bim-laesst-eine-marktbereinigung-erwarten/> (Abgerufen am 25.06.2019). 2018.
- Hutchinson A., Finnemore M.* Standardized process improvement for construction enterprises // Total Quality Management. 2009. 10. 576–583.
- Ihde André.* Kontrolle der Planungskomplexität bei Entwurf, Analyse und Konstruktion von Tragwerken. München: Fakultät für Architektur, 2018. 258.
- Jungwirth et al. .* BIM in der Verkehrsinfrastruktur. // BIM – Building Information Modeling. 2015. 68–73.
- Kemmler Roman.* Strukturoptimierung: Theorie und Anwendung. Prof. Dr.-Ing. Roman Kemmler. 2014.
- Liebich Thomas, Schweer Carl-Stephan, Wernik Siegfried.* Die Auswirkungen von Building Information Modeling (BIM) auf die Leistungsbilder und Vergütungsstruktur

- für Architekten und Ingenieure sowie auf die Vertragsgestaltung. Schlussbericht. Online Ressource: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Digitales/bim-auswirkungen-schlussbericht.pdf?__blob=publicationFile (Abgerufen am 25.06.2019). 2011.
- Lin Eve, Roithmayr Robert.* Building Information Modeling: Next steps for tensile membrane architecture // Structural Membranes 2015 // Textile Composites and Inflatable Structures VII. 10. Barcelona: International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), 2015. 93–104.
- Lin Eve, Roithmayr Robert, Chiu Simon.* A Review of BIM Maturity for Tensile Membrane Architecture // Proceedings of IASS Annual Symposium 2015. Amsterdam, 2015. 13.
- Meschke Günther.* Berichte der Fachtagung Baustatik-Baupraxis 13 am 20. und 21. März 2017 an der Ruhr-Universität Bochum. 2017. 552.
- Mittelstädt Norbert.* Leitlinie zur projektbezogenen Spezifikation und erfolgsabhängigen Honorarbemessung von extern beauftragten Projektmanagement-Leistungen im Hochbau: Zugl.: Kassel, Univ., Diss, 2006. 6. Kassel: Kassel Univ. Press, 2006. 328. (Schriftenreihe Bauwirtschaft 1, Forschung).
- Mutis Timo Ivan; Hartmann.* Advances in Informatics and Computing in Civil and Construction Engineering. Cham: Springer International Publishing, 2019. 914.
- Nöldgen et al. .* Einsatz von BIM im Hochbau – Effekte auf die Tragwerksplanung // Bautechnik, 91(4):. 2014. 251–256.
- Schiller Klaus, Faschingbauer Gerald.* Die BIM-Anwendung der DIN SPEC 91400. 2016. 1. Aufl. 88. (Beuth Innovation).
- Seidel Michael.* Textile Hüllen: Bauen mit biegeweichen Tragelementen. Berlin: Ernst & Sohn, 2008. 236.
- Smithsonian Institution. Office of Facilities Engineering and Operations .* National Air & Space Museum. North Vestibule Sections Option 1. Washington, 2017. 699.
- Sommer Hans.* Projektmanagement im Hochbau: Mit BIM und Lean Management. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016. 4. Auflage. 134.
- Steinegger Sebastian.* Parametrisch unterstützte Tragwerksplanung bei räumlichen Stabtragwerken: Einsatzgebiete, Randbedingungen und Grenzen. München, 2015. 180.
- Steiner Michael; Mirboland Mahsa Maria; Theiler.* 30. Forum Bauinformatik: Von jungen Forschenden für junge Forschende : Tagungsband, 19.-21. September 2018, Weimar,

Informatik im Bauwesen, Bauhaus-Universität Weimar. Weimar: Blueprint. e.K., 2018.
1. 420.

Wagner Rosemarie. Bauen mit Seilen und Membranen. Berlin: Beuth Verlag GmbH,
2016. 512. (Bauwerk).

Anhang

Liste der benutzten BIM-Normen weltweit

ISO 29481 (international) - Building Information Modeling <https://www.iso.org/standard/60553.html>

EN ISO 19650 BS EN ISO 19650-1 Organisation der Informationen von Bauwerken – Informationsverwaltung bei BIM-Verwendung Teil 1: Konzepte und Prinzipien (Concepts and Principles) BS EN ISO 19650-2 Organisation der Informationen von Bauwerken – Informationsverwaltung bei BIM-Verwendung Teil 2: Entwurfs- und Konstruktionsphase eines Gebäudes (Delivery phase of assets)

BS PAS-1192 (UK) - Verwaltung der Bauwerksinformationen mittels BIM ***die englischen BIM-Vorschriften werden in der ISO 19650 integriert. 7 June 2018 - BS PAS-1192 (UK) gilt nicht mehr <https://www.bsigroup.com/en-GB/about-bsi/media-centre/press-releases/2018/june/bim-standards-update-from-bsi/>

BS EN ISO 19650 (UK)

2018, BS EN ISO 19650-1:2018 Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) - information management using building information modelling. Concepts and principles

2018, BS EN ISO 19650-2:2018 Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) - information management using building information modelling. Delivery phase of the assets <https://www.thenbs.com/PublicationIndex/Documents/Details?DocId=314028>

NBIMS-US - National BIM Standard-United States (aktuelle Version - v3.0)

Region D-A-CH

ÖNORM A-6241-1 Digitale Bauwerksdokumentation - Teil 1: CAD-Datenstrukturen und Building Information Modeling (BIM) - Level 2 ÖNORM A-6241-2 Digitale Bauwerksdokumentation - Building Information Modeling (BIM) - Level 3-iBIM <https://www.austrian-standards.at/produkte-leistungen/kostenlose-downloads/supplements-zu-normen/oenorm-a-6241-1/>

SN EN ISO 12006 - Organization of information about construction works - Part 3: Framework for object-oriented information SN EN ISO 29481 - Bauwerksinformationsmodelle - Handbuch der Informationslieferungen - Teil 2: Interaktionsframework <http://www.iso.org/standard/60553.html>

[//www.sia.ch/de/der-sia/kommissionen-fachraete/2051/](http://www.sia.ch/de/der-sia/kommissionen-fachraete/2051/)

VDI 2552 - Building Information Modeling (BIM) <https://www.vdi.de/richtlinien/unsere-richtlinien-highlights/vdi-2552>